

TREBAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

DESARROLLO DE UNA UNIDAD DE CONTROL ELECTRÓNICO (ECU) DEDICADA AL GOBIERNO DE PEQUEÑOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA



MEMORIA TÉCNICA

Autor: Jaime Martínez Fernández
Director: Manuel Manzanares Brotons
Convocatoria: Junio 2019

Resumen

El presente trabajo tiene por objetivo desarrollar un prototipo de una Unidad de Control Electrónico (ECU) dedicada al gobierno de motores de gasolina, de 4 tiempos y de pequeña cilindrada. La ECU será capaz de controlar la apertura de un inyector de gasolina y el encendido de la mezcla, gracias a la información arrojada por un sensor de posición del cigüeñal, un sensor de posición del árbol de levas, un sensor de posición del acelerador y un sensor de temperatura del motor.

Por otro lado, las variables de mayor interés tales como el régimen de giro del motor, la temperatura del motor o la posición del acelerador, podrán ser visualizadas en un display. También se ha dotado a la ECU de conectividad bajo el estándar RS232, que enviará las variables anteriormente citadas a cualquier ordenador, a través de un adaptador RS232 a USB. Además, se ha incorporado un testigo luminoso que lanza una alerta cuando la temperatura del motor es anormalmente alta.

La ECU desarrollada tiene un objetivo didáctico, pues está pensada para ser instalada en maquetas de motores. Gracias a ella, se podrán instruir y formar a los alumnos de ciclos formativos y a los alumnos de Universidad, que cursen materias relacionadas con la automoción. Este proyecto se podría escalar, añadiendo más sensores, con el fin de mejorar la regulación. De esta forma, la ECU podría ser comercializada para una aplicación real.

Finalmente, debido a la imposibilidad de disponer de un motor térmico para ejecutar este proyecto, se han simulado algunas de las señales más características, como la del sensor de posición del cigüeñal y la del sensor de posición del árbol de levas, empleando una FPGA.

Resum

El present treball té per objectiu desenvolupar un prototip d'una Unitat de Control Electrònic (ECU) dedicada al govern de motors de gasolina, de 4 temps i de petita cilindrada. L'ECU serà capaç de controlar l'obertura d'un inductor de gasolina i l'encès de la mescla, gràcies a la informació llançada per un sensor de posició del cigonyal, un sensor de posició de l'arbre de lleves, un sensor de posició de l'accelerador i un sensor de temperatura del motor.

D'altra banda, les variables de major interès tals com el règim de gir del motor, la temperatura del motor o la posició de l'accelerador, podran ser visualitzades en un display. També s'ha dotat a l'ECU de connectivitat sota l'estàndard RS232, que enviarà les variables anteriorment citades a qualsevol ordinador, a través d'un adaptador RS232 a USB. A més, s'ha incorporat un testimoni lluminós que llança una alerta quan la temperatura del motor és anormalment alta.

L'ECU desenvolupada té un objectiu didàctic, perquè està pensada per a ser instal·lada en maquetes de motors. Gràcies a ella, es podran instruir i formar als alumnes de cicles formatius i als alumnes d'Universitat, que cursin matèries relacionades amb l'automoció. Aquest projecte es podria escalar, afegint més sensors, amb la finalitat de millorar la regulació. D'aquesta forma, l'ECU podria ser comercialitzada per a una aplicació real.

Finalment, a causa de la impossibilitat de disposar d'un motor tèrmic per a executar aquest projecte, s'han simulat algunes dels senyals més característics, com la del sensor de posició del cigonyal i la del sensor de posició de l'arbre de lleves, emprant una FPGA.

Abstract

In this thesis, an Electronic Control Unit (ECU) to control gasoline engines 4 strokes and with a small cubic capacity, is developed. This ECU will be able to control a gasoline injector opening and the air-gasoline mixture ignition, using different sensors such as a crankshaft position sensor, camshaft position sensor, an accelerator position sensor or an engine temperature sensor.

On the other hand, the most significant variables, such as rotation speed, accelerator position, and engine temperature, will be printed in an LCD display. Communications are also been implemented, using the RS232 standard and using a from RS232 to USB converter to connect it to any computer. A light has been also included to warn if engine temperature is extremely high.

This ECU could be installed in engine models to teach vocational formation students and university students about gasoline engines and automotive. However, this ECU could be implemented in a real application if the number of sensors would be increased and the air-fuel ratio would be regulated correctly.

Finally, as the author has not had got access to any gasoline engine, the camshaft position sensor and the crankshaft position sensor have been simulated using a field programmable gateway array (FPGA).

Agradecimientos

Dedicado a mis padres que me lo han dado todo en esta vida, a mi abuelo Isaac que le habría hecho ilusión verme llegar a este momento, al resto de mi familia por su incondicional apoyo, a Ernesto por embaucarme en esta aventura de estudiar ingeniería y a Manuel, mi tutor, por el soporte y atención que me ha brindado durante estos meses.

Glosario

ECU (Electronic Control Unit o Engine Control Unit): Unidad de Control Electrónico de un motor de combustión interna.

PMS: Punto Muerto Superior del pistón.

PMI: Punto Muerto Inferior del pistón.

AAA (Avance Apertura de Admisión): Número de grados existentes entre la apertura de la válvula de admisión y el PMS.

RCA (Retraso Cierre e Admisión): Número de grados existentes entre el PMI y el cierre de la válvula de admisión.

AAE (Avance Apertura de Escape): Número de grados existentes entre la apertura de la válvula de escape y el PMI.

RCE (Retraso Cierre de Escape): Número de grados existentes entre el PMS y el cierre de la válvula de escape.

AFR_e : Mezcla estequiométrica de aire y gasolina.

K-Jetronic (Kontinuierlich-Jetronic): Inyección Continua. Es un tipo de inyección mecánica.

ADC (Analog to Digital Converter): Convertidor Analógico a Digital.

LCD (Liquid Cristal Display): Pantalla de cristal líquido.

ISIS (Intelligent Schematic Input System): Herramienta de Proteus para diseñar y simular circuitos, principalmente digitales.

ARES (Advanced Routing and Editing Software): Herramienta de Proteus para diseñar placas de circuito impreso.

Duty-cycle: Porcentaje de tiempo durante el cual el inyector se encuentra abierto respecto al periodo que tarda el motor en completar dos revoluciones.

RPM: Revoluciones por minuto.

Índice

RESUMEN	I
RESUM	II
ABSTRACT	III
AGRADECIMIENTOS	IV
GLOSARIO	V
1. PREFACIO	1
1.1. Origen del trabajo	1
1.2. Motivación	1
1.3. Requerimientos previos.....	2
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Objetivos del trabajo.....	3
2.2. Alcance del trabajo	4
3. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	5
3.1. Motor rotativo	5
3.2. Motor alternativo.....	6
4. EL MOTOR OTTO	8
4.1. Funcionamiento del motor Otto.....	8
4.1.1. Carrera de admisión	10
4.1.2. Carrera de compresión.....	10
4.1.3. Carrera de expansión	11
4.1.4. Carrera de escape.....	11
4.2. Sistemas de encendido	13
4.2.1. Sistema de encendido convencional.....	14
4.2.2. Sistema de encendido transistorizado a contactos.	17
4.2.3. Sistema de encendido transistorizado con generador inductivo	17
4.2.4. Sistema de encendido transistorizado con generador Hall	18
4.2.5. Encendido electrónico integral	19
4.2.6. Encendido electrónico sin distribuidor	21
4.3. Sistemas de alimentación	22
4.3.1. Carburador.....	23

4.3.2.	Inyección indirecta mecánica	24
4.3.3.	Inyección electrónica monopunto	25
4.3.4.	Inyección indirecta electrónica multipunto	26
4.3.5.	Inyección directa	27
5.	POSIBLES SOLUCIONES	29
5.1.	Microcontrolador	29
5.2.	Pantalla LCD	29
5.3.	Sensor de revoluciones y de posición del motor	30
5.4.	Acelerador	30
5.5.	Sensor de temperatura	31
5.6.	Testigo de temperatura	31
5.7.	Sistema de inyección.....	31
5.8.	Sistema de encendido.....	32
5.9.	Comunicaciones	32
6.	SOLUCIONES ESCOGIDAS	33
6.1.	Alimentación	33
6.2.	Microcontrolador.....	33
6.3.	Pantalla LCD	35
6.4.	Acelerador	35
6.5.	Sensor de temperatura	36
6.6.	Testigo de temperatura	36
6.7.	Sistema de inyección.....	36
6.8.	Sistema de encendido.....	37
6.9.	Comunicaciones	37
7.	DISEÑO DEL PROTOTIPO DE PRUEBAS	38
7.1.	Alimentación	39
7.1.1.	Cálculo del disipador	40
7.2.	Microcontrolador	41
7.3.	Sensor de revoluciones	42
7.4.	Acelerador	44
7.5.	Sensor de temperatura	45
7.6.	Indicador de temperatura.....	46
7.7.	Pantalla LCD	47

7.8.	Sistema de inyección.....	48
7.8.1.	Cálculo del disipador	52
7.9.	Sistema de encendido.....	52
7.9.1.	Cálculo de los disipadores	53
7.10.	Diseño de la placa de circuito impreso.....	55
8.	DISEÑO DE LOS MAPAS	56
8.1.	Mapa de inyección	56
8.2.	Mapa de encendido	59
9.	DISEÑO DEL SOFTWARE	62
9.1.	Rutina principal	62
9.2.	Rutina main().....	63
9.3.	Rutina Timer 2.....	66
9.4.	Rutina Timer 3.....	67
9.5.	Rutina interrupción externa 0.....	68
9.6.	Rutina interrupción externa 1.....	69
9.7.	Interrupción externa 2	70
9.8.	Rutina de cálculo del incremento de duty-cycle debido a la temperatura	71
9.9.	Rutina encargada de imprimir valores en el display	72
9.10.	Rutina de cálculo de duty-cycle y avance de encendido.....	73
9.11.	Rutina comunicaciones.....	74
10.	DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE DE LA FPGA	76
11.	SIMULACIONES	77
11.1.	Sensor de revoluciones	77
11.1.1.	Prototipo de pruebas	77
11.1.2.	Versión comercial	80
11.2.	Inyector y encendido	82
11.3.	Sensor de temperatura	86
11.4.	Acelerador	87
11.5.	Pantalla LCD	87
11.6.	Comunicaciones	88
12.	COMUNICACIONES	90
13.	NORMATIVA	91

13.1. Normativa relativa a las emisiones de gases contaminantes	91
13.2. Normativa relativa a la compatibilidad electromagnética.....	92
13.3. Otra normativa aplicable	93
14. IMPACTO AMBIENTAL	94
15. PLANIFICACIÓN Y DIAGRAMA DE GANTT	95
16. CONCLUSIONES	98
17. POSIBLES MEJORAS	99
18. BIBLIOGRAFÍA.....	100

1. Prefacio

1.1. Origen del trabajo

La automoción está cada vez más vinculada a la electrónica. Los motores de combustión interna han pasado de estar controlados mecánicamente a estarlo electrónicamente. A medida que la electrónica se ha ido abriendo paso dentro de la automoción, se han conseguido diseñar vehículos más eficientes y seguros.

Este proyecto pretende poner en manifiesto el avance que ha supuesto la electrónica en el desarrollo de motores de combustión interna y diseñar y trabajar con un concepto muy opaco como es la cartografía de un motor.

1.2. Motivación

A lo largo de la historia, el desarrollo de nuevas técnicas de transporte de mercancías y de personas, ha supuesto un factor determinante para el progreso de la sociedad. Las calzadas romanas, el desarrollo de nuevas técnicas de navegación o el despliegue de infraestructuras férreas y de trenes de vapor en el siglo XVIII, permitieron a sus respectivas sociedades entrar en una nueva era de progreso tecnológico y social.

Actualmente, existen múltiples alternativas de transporte, que utilizan diferentes tecnologías de propulsión. Una de las más utilizadas es aquella que aprovecha la combustión de hidrocarburos, principalmente gasolina y diésel. Sin embargo, esta tecnología presenta algunos inconvenientes: la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, la escasez de pozos petrolíferos y los conflictos geopolíticos provocados por el hecho de que un bien tan codiciado como es el petróleo, se encuentre poco repartido. Por todo ello, se deben buscar formas de propulsión alternativas.

El coche eléctrico se está posicionando como gran alternativa. No obstante, la baja autonomía que aún presenta esta tecnología, el elevado precio de estos vehículos o la aún sin desarrollar infraestructura de carga, hacen que este tipo de vehículos no puedan reemplazar a los de combustión interna en el corto plazo. Por ende, se debe buscar la manera de maximizar el rendimiento de estos motores y minimizar el consumo de hidrocarburos y la emisión de gases contaminantes.

En las últimas décadas, la electrónica ha tenido una fuerte, y cada vez mayor, implementación dentro de la industria del automóvil, y ha permitido controlar con mayor precisión, la combustión y el aporte

energético de los combustibles, consiguiendo así un aumento del rendimiento. Con este proyecto, se espera aumentar los conocimientos sobre el funcionamiento de una unidad de control electrónico aplicada para el automóvil.

Además, se trata de un proyecto muy transversal, en el que se deben de aplicar conocimientos de múltiples ramas de la electrónica, tales como el procesamiento de señales, la programación de microcontroladores, la implementación de sistemas de comunicación o la electrónica de potencia; por lo que se espera que también sirva para asentar y poner en práctica los conocimientos aprendidos en su paso por la carrera de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática.

1.3. Requerimientos previos

Para llevar a término este proyecto, serán necesarios algunos conocimientos de mecánica del automóvil, especialmente en lo que se refiere a la comprensión del modo de funcionamiento de un motor de gasolina de 4 tiempos. No obstante, algunos conceptos claves serán explicados en la introducción del proyecto.

También serán necesarios conocimientos básicos de electrónica, especialmente de microcontroladores y de electrónica de potencia, así como de programación en C.

2. Introducción

Desde el comienzo de los tiempos, la humanidad ha tenido la necesidad de transportar personas y mercancías de la forma más rápida y económica posible. Tanto es así, que el progreso de las civilizaciones ha dependido enormemente de la capacidad de mejorar estos medios de locomoción. Las mejoras de las comunicaciones han sido uno de los elementos que han propiciado los mayores cambios políticos y sociales. Así pues, algunos de los inventos más revolucionarios de las antiguas civilizaciones fueron la rueda (3500 A.C.), la cual supuso una mejora sustancial en el transporte de mercancías y en la agricultura [1]; o las calzadas romanas, que permitieron vertebrar el imperio romano y agilizar el transporte de mercancías.

La mejora de los medios de transporte y locomoción también han sido vitales en el terreno militar. Un claro ejemplo de este caso se encuentra en la cultura escandinava. Hacia el siglo 8 D.C., desarrollaron el Drakar, un tipo de embarcaciones superiores al del resto de potencias militares de la época, que les otorgaron un dominio militar sobre el mar.

Sin embargo, la sociedad actual se enfrenta a otro tipo de problemas menos belicosos. La globalización ha aumentado la necesidad de transporte de las personas y, por otro lado, ha contribuido a desarrollar un modelo económico muy dependiente de la industria, en el que las exportaciones tienen un papel fundamental. Por ello, se debe crear un modelo de transporte económico y accesible pero que, a su vez, respete los recursos naturales tan limitados de los que se disponen.

Hoy en día el motor Otto es uno de los más utilizados en automoción y, debido a las normas anticontaminación que están restringiendo en mayor medida el uso de los motores diésel, y la falta de autonomía e infraestructura del coche eléctrico, este tipo de motores presentan una gran oportunidad de negocio para las empresas automovilísticas, al menos en el corto plazo. Sin embargo, cada vez están sometidos a una legislación más restrictiva en materia de anticontaminación y, debido a esto, los ingenieros que desarrollen ECUs (Unidades de Control Electrónico) para motores de gasolina deberán de buscar la manera de que sus motores sean lo más eficientes posibles. Este trabajo se limitará a crear una ECU que implemente algunas de las medidas utilizadas para aprovechar al máximo la energía térmica producida durante el proceso de combustión de la gasolina (como por ejemplo los avances de encendido). También se le dotará a la ECU de conectividad para poder visualizar la información de los sensores en diferentes dispositivos electrónicos.

2.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una unidad de control electrónico, que permita gobernar un motor Otto. Dicha unidad de control electrónico (ECU a partir de ahora), actuará sobre un



inyector de gasolina y una bujía, en función de las señales recibidas por el acelerador, el sensor de posición del árbol de levas, el sensor de posición del cigüeñal, y el sensor de temperatura; y se dispondrá de un display LCD en el cual se podrán ver los parámetros básicos de funcionamiento del motor, tales como las revoluciones, la posición del acelerador o la temperatura del motor.

Además de lo mencionado, la ECU se podrá conectar a cualquier dispositivo, con el fin de visualizar los datos recogidos por los sensores, a través de un programa capaz de leer el puerto serie. Esta comunicación, se llevará a cabo bajo el estándar RS232.

2.2. Alcance del trabajo

Este proyecto tiene como objetivo desarrollar una unidad de control electrónico que permita gobernar pequeños motores de gasolina. La ECU va a ser un modelo con el que experimentar en un laboratorio y en ningún caso se pretende hacer un modelo comercial. Conviene tener presente que la legislación, en materia anticontaminación, cada vez es más restrictiva y, por ende, se deberían instalar múltiples sensores para conseguir un control lo más eficiente posible. Sin embargo, una ECU de estas características requeriría de años de desarrollo de un equipo de ingenieros y, este proyecto, va a ser realizado de forma individual y en un plazo de 6 meses. Por lo tanto, la ECU que aquí se diseña corresponde más a un prototipo de pruebas que requeriría de más horas de desarrollo y financiación para poder ser comercializada. Sin embargo, se van a diseñar una ECU perfectamente funcional y con los sistemas básicos que podrían ejercer el control de un motor Otto.

3. Motores de combustión interna

Los motores de combustión interna son máquinas capaces de transformar la energía térmica aportada por un combustible, a través de una combustión, en energía mecánica. Durante el proceso de combustión, se hace incrementar la presión, idealmente de forma isocórica, dentro de una cámara de combustión. Este incremento de presión se puede transformar en energía mecánica de diferentes formas, en función del tipo de motor. Bajo este precepto, en automoción existen dos tipos de motores:

3.1. Motor rotativo

También conocido como motor Wankel. La combustión de la gasolina hace girar a un pistón rotativo. La principal ventaja de este tipo de motores es que la energía producida por el combustible se transforma directamente en un movimiento rotativo. Esto hace que el movimiento producido sea más natural, y que presente menos vibraciones respecto a su competidor, el motor alternativo. Además, este motor está formado por menos elementos mecánicos, lo cual le dota de mayor simpleza. También cabe destacar que el ciclo de funcionamiento de este motor, a diferencia del alternativo, no presenta puntos muertos, por lo tanto, el pistón estará sometido a menos inercias y su movimiento será más continuo y, dado que su eje gira tres veces más rápido que el rotor, éste podrá revolucionarse más. Todo lo mencionado redundará en que este motor, con una menor cilindrada, sea más potente y tenga una mayor rapidez de respuesta que el motor alternativo.

Sin embargo, este motor también presenta grandes desventajas. La más crítica es la falta de estanqueidad de la cámara de combustión que provoca que los segmentos del pistón se tengan que cambiar con relativa frecuencia, y que el consumo de aceite sea elevado (lo cual genera un problema grave de emisiones). Además, este motor presenta un consumo elevado de gasolina. Debido a la mala estanqueidad de este motor, no existen versiones con alta relación de compresión por lo que solo puede funcionar con gasolina [2].

El motor Wankel está prácticamente en desuso. Los fabricantes de automóviles no han apostado por este tipo de motores debido a los grandes problemas técnicos que presentaba, especialmente el de la estanqueidad. El modelo de vehículo más popular que monta este tipo de motores es el Mazda RX 8. Mazda lo dejó de fabricar en 2012, sin embargo, el fabricante nipón ha anunciado que volvería a presentar un motor rotativo en 2019 [3].



Figura 3.1.1. Motor rotativo [4].

3.2. Motor alternativo

Es, con diferencia, el motor más utilizado en automoción. Su funcionamiento está basado en el movimiento de un émbolo dentro de un cilindro. Mediante un mecanismo de biela manivela, el movimiento lineal del motor es transformado en un movimiento rotativo.

La ventaja de este tipo de motores es la elevada relación de compresión que poseen llegando, en el caso de los motores diésel, a relaciones de compresión superiores incluso a 22:1. Esta característica es fundamental ya que permite reducir las emisiones y el consumo de combustible. Por otro lado, los motores de gasolina tienen una relación de compresión más reducida (de aproximadamente 8:1) [5].

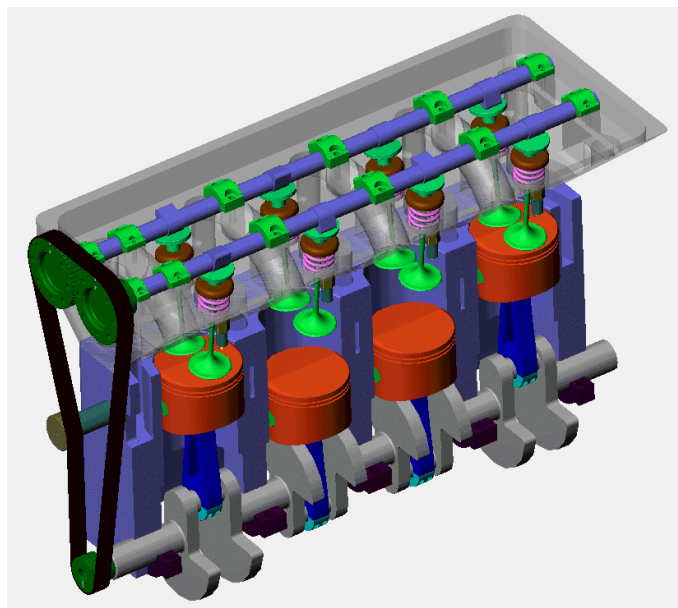


Figura 3.2.1. Motor alternativo [6].

4. El motor Otto

El primer motor de combustión interna fue construido por Etienne Lenoir. En 1861 Lenoir confeccionó un motor que utilizaba un compuesto derivado del petróleo como combustible, capaz de ofrecer una potencia de hasta 2 CV. Este motor fue instalado en un barco, y 2 años más tarde, en 1863, Lenoir construyó una segunda versión de 1,5 CV adaptado para ser instalado en un carruaje. Lenoir fue capaz de recorrer 18 kilómetros en tres horas. Sin embargo, este modelo presentaba problemas de sobrecalentamiento y de pérdidas de gas [7].

En 1861 Nikolaus Otto patentó un motor que funcionaba mediante un ciclo de dos tiempos. La máquina fue desarrollada basándose en los principios del motor de Lenoir, el cual tuvo la oportunidad de conocer gracias a su trabajo como vendedor ambulante. Otto se dio cuenta de que, utilizando un combustible líquido como la gasolina, las prestaciones del motor aumentarían. En 1867, el motor de dos tiempos ideado por Otto consiguió ganar la medalla de oro en la feria mundial de París. Finalmente, en 1876 Otto construyó el primer motor de 4 tiempos, y supuso una alternativa práctica al motor de vapor. Tal fue la importancia de su invento que, en la actualidad, la mayoría de los coches de gasolina fabricados, utilizan en ciclo de funcionamiento del motor de Otto [8].

4.1. Funcionamiento del motor Otto.

El motor Otto está formado por un pistón, alojado en el interior de un cilindro, que se mueve de forma axial. Su ciclo de trabajo se basa en 4 tiempos. Cada uno de estos tiempos equivaldrá a una carrera del pistón. Estos 4 tiempos son: admisión, compresión, expansión y escape. También existen dos puntos críticos: el punto muerto superior (PMS o TDC por sus siglas en inglés Top Dead Centre) correspondiente al instante en el que el pistón se encuentra en su punto más alto, y punto muerto inferior (PMI o BDC por sus siglas en inglés Botton Dead Centre) denominado al momento en el que el pistón se encuentra en su posición más baja (siempre que consideremos que el motor está orientado verticalmente). En estos dos puntos, el pistón cambia su trayectoria de descendente a ascendente, en el caso del PMI o de ascendente a descendente en el PMS; por lo que, en estos puntos, se experimenta un gran esfuerzo mecánico.

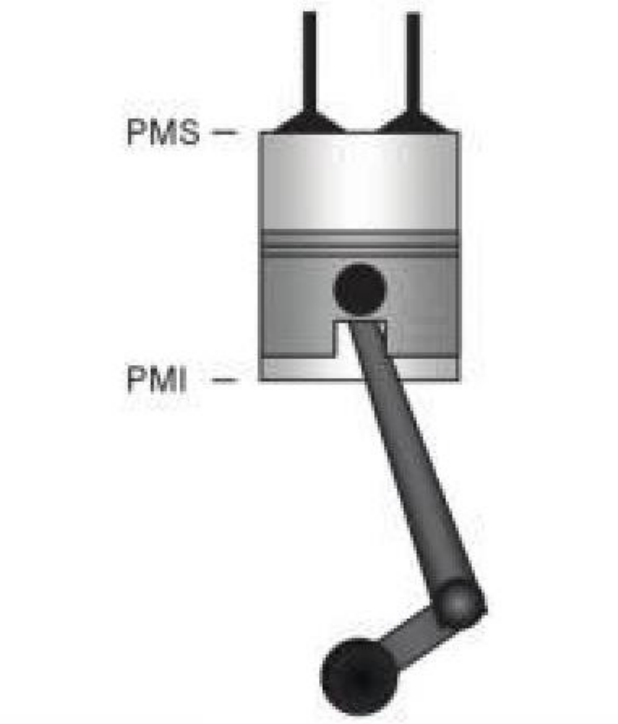


Figura 4.1.1. Representación del PMS y PMI [9]

Cuando se analiza el funcionamiento de un motor de combustión interna, es frecuente utilizar los grados como medida para indicar el instante en el que se producen cada uno de los acontecimientos, tomando como referencia la posición del cigüeñal. Dado que la carrera de admisión es considerada como la inicial, el cigüeñal estará en una posición de 0° cuando el cilindro 1 (en el caso de los motores de más de un cilindro) esté en el PMS iniciando la carrera de admisión. De esta forma se establece que la admisión de este cilindro transcurre entre los 0° y los 180° , la compresión entre los 180° y 360° , la expansión entre los 360° y 540° , y el escape entre los 540° y los 720° .

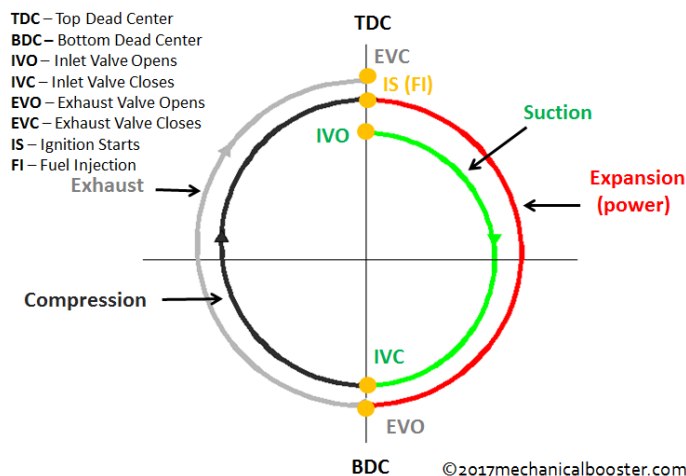


Figura 4.1.2. Ciclo teórico de un motor Otto [10].

4.1.1. Carrera de admisión

Inicialmente el pistón se encuentra en el PMS. En este instante, la válvula de admisión es abierta y el pistón comienza a descender hacia el PMI. Durante esta carrera se genera un vacío en el interior del cilindro que origina la succión de aire por la válvula de admisión.

Antiguamente, la mezcla de aire y gasolina se hacía mediante carburación o mediante inyección indirecta. Por tanto, el gas que llenaba el cilindro era una mezcla de aire y gasolina. Sin embargo, los motores modernos son de inyección directa. Esto quiere decir que la mezcla se realiza en el interior del cilindro y, por tanto, el gas que entra en el motor durante esta carrera está compuesto únicamente por aire.

4.1.2. Carrera de compresión

En esta carrera se encuentran las válvulas de admisión y escape cerradas (despreciando el cruce de válvulas del que hablaremos en apartados sucesivos). El pistón, que se encontraba en el PMI, comienza su ascenso hasta el PMS. Como las válvulas están cerradas, el aire que hay en el interior del cilindro se comprime, idealmente de forma adiabática. En los motores de inyección directa, la mezcla de aire y gasolina se realiza durante la carrera de admisión, para aprovechar la turbulencia generada por los gases entrantes en el motor para mezclar mejor el aire y el combustible, y durante esta carrera.

4.1.3. Carrera de expansión

La carrera de expansión comienza con el pistón en el PMS y con las válvulas de admisión y escape cerradas. Al comienzo de la carrera, se produce un arco eléctrico entre los electrodos de la bujía, que deflagra el combustible. Esto genera un incremento de la presión, idealmente isocórico, que desencadena el descenso del pistón hasta el PMI. Por lo tanto, esta carrera es la que produce realmente el trabajo mecánico, mientras que, en el resto de las carreras, el pistón se mueve por el efecto de la inercia de un disco masivo acoplado al cigüeñal, denominado volante de inercia.

4.1.4. Carrera de escape

Durante esta carrera el pistón asciende desde el PMI hasta al PMS. La válvula (o válvulas) de escape se encuentra abierta, lo que provoca que los gases de la combustión salgan por ella. Al finalizar esta carrera, el ciclo volvería a comenzar.

A continuación, se muestran las cuatro carreras, desde el punto de vista de la termodinámica, en un diagrama presión-volumen. En estos diagramas, las áreas encerradas por líneas que se recorren en sentido horario indican que se realiza un trabajo; mientras que, si se recorren en sentido antihorario, indican que se consume un trabajo. En este caso, se observa que es claramente mayoritaria el área realizada en sentido horario, por lo tanto, el trabajo ejercido por el motor Otto es positivo.

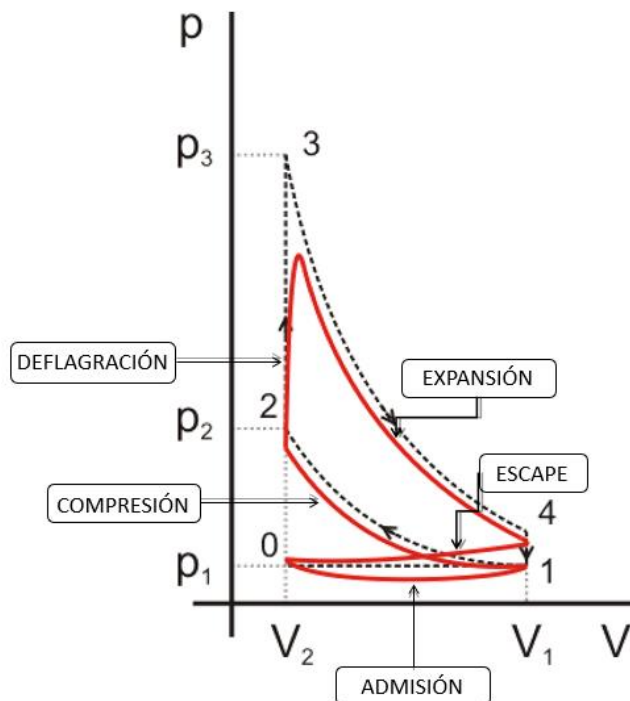


Figura 4.1.3. Diagrama Presión-Volumen de un motor Otto [11].

Los fabricantes de motores han introducido leves cambios al ciclo Otto, con el fin de mejorar y maximizar la eficiencia de éstos. Uno de los cambios es en la apertura y cierre de válvulas, tanto de admisión como en la de escape. Las válvulas de admisión no se cierran en el PMI, sino que son cerradas levemente más tarde. El motivo es que, durante la admisión, la succión producida por el motor, provoca que el gas entrante en el motor, adquiera la suficiente inercia como para continuar llenando el cilindro en los primeros instantes de la fase de compresión. A esto se le conoce como retraso del cierre de la admisión, y el número de grados de retraso depende del fabricante. Por regla general, cuanto más revolucionado sea capaz de trabajar un motor, mayor será el ángulo de retraso de cierre de admisión. Este fenómeno también ocurre con las válvulas de escape.

Del mismo modo, tanto las válvulas de admisión como las de escape, no se abren al inicio de sus respectivos ciclos, sino que lo hacen ligeramente antes, con la finalidad de que estén totalmente abiertas cuando se inicien las carreras de admisión y escape, para aumentar el flujo de aire que pasa por ellas. Llegados a este punto, se puede asegurar que, al existir un avance en la apertura de la válvula de admisión y un retraso en el cierre de la válvula de escape, existe un quinto ángulo formado por el solape de ambas válvulas, denominado cruce de válvulas. A continuación, se muestra la comparativa entre un diagrama de distribución teórico y uno real, en un motor Otto.

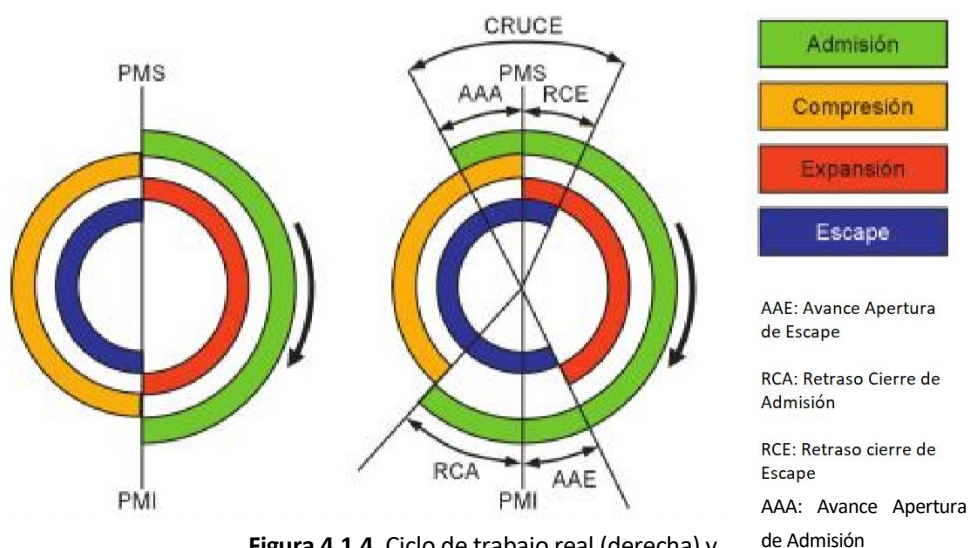


Figura 4.1.4. Ciclo de trabajo real (derecha) y teórico (izquierda) de un motor Otto [9].

La magnitud de estos ángulos depende del tipo de motor. Por ejemplo, un motor de motocicleta puede superar fácilmente las 10.000 RPM. Cuando se trabajan con motores tan revolucionados, es normal establecer unos ángulos mayores, para que el llenado de los cilindros sea más eficiente en regímenes

de revoluciones altos. Por el contrario, el motor de un coche de poca potencia y bajo consumo, suele trabajar en regímenes de revoluciones más bajos, y por ello, los ángulos son menores. Para adaptar los grados de avance y retraso de apertura y cierre de válvulas a los diferentes modos de funcionamiento de motor, los motores de última generación incorporan una tecnología conocida como distribución variable. Este sistema permite que los ángulos no serán fijos, sino que variarán en función de las condiciones de la marcha.

Por último, cabe destacar que también existe un avance de encendido. Desde el punto de vista del presente trabajo, este ángulo es el más importante, ya que se deberá programar en el microcontrolador. Para entender el motivo de la existencia del avance de encendido, debemos analizar lo que ocurre en la cámara de combustión cuando se inicia la deflagración. Cuando la mezcla de aire y gasolina existente en la cámara de combustión es quemada, esta lo hace de forma gradual. Aparece un fenómeno, conocido como frente de llama, que parte de la bujía (ya que es el punto donde se inicia la combustión), y se propaga por toda la cámara de combustión, siguiendo el comportamiento de una onda. Por este motivo, la combustión se ejecuta de forma gradual y no de forma instantánea. La problemática que subyace de este fenómeno es que la presión existente en la cámara de combustión también aumenta de forma gradual, con lo que en la práctica no se consigue un aumento de presión isocórico. Para mejorar el aprovechamiento de la energía de la combustión, es de vital importancia que su apogeo, es decir, la presión máxima producida por la combustión, se alcance en el instante inicial de la fase de expansión y, por ello, el encendido debe adelantarse unos grados. De lo contrario, el punto de presión máxima se alcanzaría con el pistón descendiendo al PMI, con lo que se produciría una merma del rendimiento del motor, especialmente en regímenes altos. El avance nuevamente dependerá del régimen de revoluciones del motor o de la riqueza de la mezcla.

El tiempo que tarda la mezcla en ser quemada depende de diversos factores, como la riqueza de la mezcla de aire y combustible, lo homogénea que sea dicha mezcla, la eficiencia en el llenado de los cilindros o la temperatura tanto ambiental como del motor. A su vez, el tiempo disponible para alcanzar el punto de máxima presión, depende íntimamente de las revoluciones por minuto del motor. A mayor número de revoluciones, menor será el tiempo disponible para deflagrar la mezcla completamente. Por ende, se deben de tener en cuenta todas estas variables para regular el avance de encendido.

4.2. Sistemas de encendido

En un motor, se entiende por sistema de encendido a todos aquellos componentes eléctricos, electrónicos y mecánicos que intervienen en la generación del arco eléctrico para provocar la deflagración de la gasolina. Para ello, los motores Otto incorporan un circuito que eleva la tensión, generando picos de entre 4 kV y 20 kV (este valor puede variar en función del fabricante). Las sobretensiones son utilizadas para ionizar el gas existente entre los electrodos de la bujía, separados a

una distancia aproximada de 1 mm. A esta distancia de separación se le conoce como distancia disruptiva, y viene dada por el fabricante del motor. Al ionizar el aire, se genera un arco eléctrico que provoca la deflagración de la mezcla de aire y gasolina. A continuación, se muestra el circuito típico de encendido.

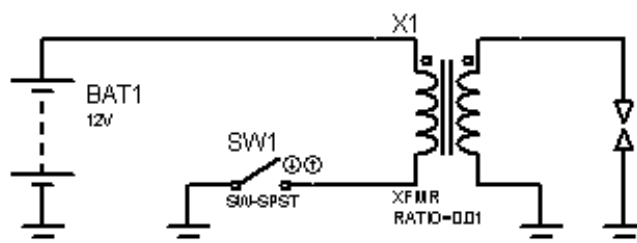


Figura 4.2.1. Esquema de un circuito de encendido (fuente: propia)

El circuito está formado por un transformador. Este transformador es denominado como bobina de encendido, en el argot de la automoción. El bobinado primario del transformador consta de entre 100 y 300 espiras fabricadas en cobre, mientras que el secundario cuenta con un número de espiras de entre 10.000 y 30.000 [9]. Aun así, los valores varían en función del fabricante y del modelo.

Como se puede apreciar en la figura, se ha conectado un interruptor al primario de la bobina. Cuando el motor está encendido, el interruptor abre y cierra el circuito continuamente. Este interruptor, al cerrar el circuito, alimenta la bobina con 12 V procedentes de la batería (y del alternador). Cuando se abre el circuito, se genera una fuerza contraelectromotriz en la bobina que induce un pico de tensión en el secundario de la misma, de varios kilovolts. Este pico de tensión consigue ionizar el aire existente entre los electrodos de la bujía, y provoca el arco voltaico, y es este arco el que provoca la deflagración de la mezcla de aire y gasolina.

La inclusión de la electrónica en el sistema de encendido de los motores Otto, supuso un gran avance, pues permitió desarrollar motores más eficientes y potentes. Para que el lector se dé cuenta del impacto que tuvo, a continuación, se expone un breve recorrido histórico desde los primeros sistemas de encendido, hasta los encendidos actuales.

4.2.1. Sistema de encendido convencional

También conocido como sistema Kettering, en honor a su inventor Charles Franklin Kettering. Es uno de los tipos de encendidos más antiguos que existen y, por ello, actualmente solo se utiliza en vehículos clásicos. Este sistema, como veremos a continuación, carece de componentes electrónicos, y el control

del encendido se realiza íntegramente de forma mecánica. Debido a su falta de precisión y eficiencia, ha quedado relegado.

El sistema está formado por una única bobina de encendido, que alimenta a todas las bujías. La bobina es capaz de generar unos picos de tensión lo suficientemente altos, como para ionizar el aire existente entre los electrodos de las bujías, y producir así un arco eléctrico. Sin embargo, dado que la bobina de encendido es alimentada con 12 V de corriente continua en su arrollamiento primario, es necesario implementar un sistema que varíe el flujo eléctrico. Por ello, los motores que incorporaban este encendido poseían un elemento llamado conjunto distribuidor. Dentro del conjunto distribuidor, había un eje, que giraba solidario al motor. Dicho eje poseía una leva y era esta leva la que abría y cerraba el circuito del primario de la bobina de encendido, actuando sobre un contacto mecánico denominado ruptor.

El circuito, disponía de un condensador situado entre los contactos del ruptor, con la finalidad de absorber las sobretensiones generadas en el primario. De esta forma, aumentaba la durabilidad de los contactos del ruptor.

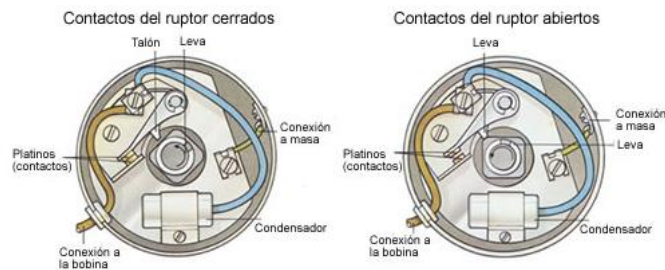


Figura 4.2.1.1. Ruptor cerrado (izquierda) y abierto (derecha) [12].

También se implementaron unos contrapesos que giraban solidarios a la leva. El motivo de su existencia era que, a medida que aumentaban las revoluciones del motor; los contrapesos, debido a la acción de la fuerza centrífuga, eran capaces de vencer la fuerza de los muelles, y expandirse. De esta forma se conseguía actuar sobre un mecanismo que permitía avanzar el encendido [13].

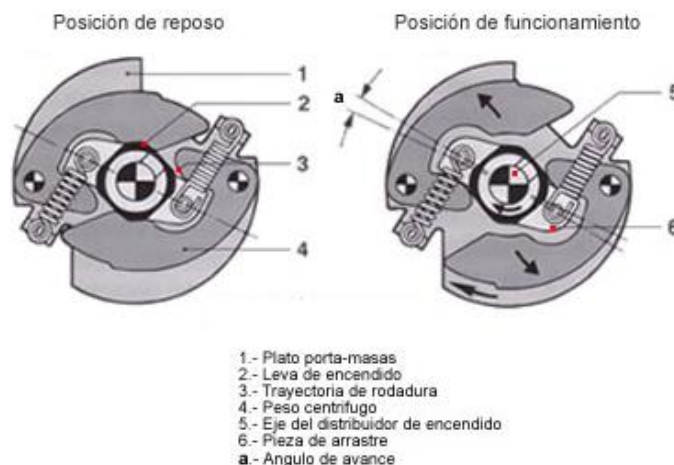


Figura 4.2.1.2. Avance centrífugo [13].

El sistema también incorporaba una cápsula manométrica que albergaba una membrana en su interior. La membrana separaba la cápsula en dos cámaras independientes. Una de esas cámaras presentaba un orificio que aseguraba que en su interior se encontrara a presión atmosférica, mientras que la otra cámara estaba conectada al colector de admisión. De esta forma, cuando el motor era acelerado, también se aceleraba el gas que entraba al motor y, por tanto, la presión en el colector de admisión disminuía. Por consiguiente, debido al efecto Venturi, la presión en el interior de una de las cámaras de la membrana se reducía, lo que provocaba su desplazamiento, y permitía actuar sobre mecanismo que regulaba el avance de encendido.

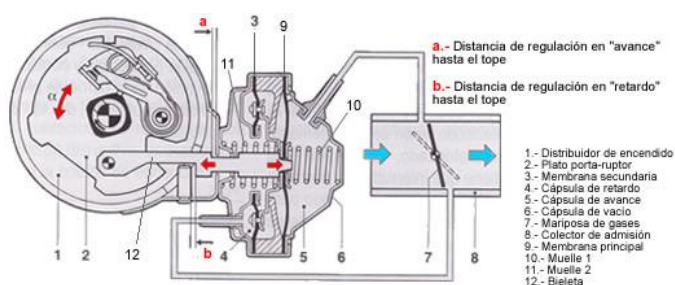


Figura 4.2.1.3. Avance por vacío [13].

Por último, en aquellos motores de más de un cilindro, existía un elemento llamado rotor, que giraba solidario con la leva y el cigüeñal del motor, y permitía dirigir la sobretensión a la bujía del cilindro adecuado. De esta forma, solo se precisaba de una bobina para todos los cilindros del motor. Este elemento tenía una función similar a la de un Switch y el principal problema que presentaba era el desgaste que provocado por el mal contacto entre sus terminales.

4.2.2. Sistema de encendido transistorizado a contactos.

El sistema de encendido transistorizado por contactos (TSZ-K), sigue los mismos principios de funcionamiento que el sistema de encendido Kettering. Aunque supuso una gran mejora respecto a su predecesor, este sistema también se encuentra obsoleto.

Constan de los mismos elementos constructivos que el encendido de Kettering (bobina de encendido, bujías, conjunto distribuidor, etc.) con la diferencia de que en el sistema de encendido TSZ-K, se añadió un transistor NPN (o varios transistores en un montaje Darlington), en el primario del transformador. El ruptor se conectaba a la base del transistor, el primario de la bobina al emisor y el colector a masa.

La principal ventaja que supuso el sistema de encendido TSZ-K respecto al Kettering, fue que permitió aumentar la corriente con la que se alimentaba al primario del transformador, reduciendo la corriente con la que trabajaba el ruptor y, con ello, el desgaste de los platinos. Al aumentar la corriente del primario, también se redujo el periodo de los transitorios de carga de la bobina, lo que posibilitó hacer que los motores alcanzar regímenes de revoluciones más altos. Por otra parte, se conseguía unas mayores diferencias de potencial entre los electrodos de la bujía, lo cual aumentaba la fiabilidad del sistema.

4.2.3. Sistema de encendido transistorizado con generador inductivo

También se conoce como TSZ-I. Es el sucesor, desde un punto de vista cronológico, del encendido TSZ-K. Supuso un gran avance ya que este sistema eliminó el ruptor e incorporó en su lugar un generador inductivo.

El generador inductivo está compuesto por un rotor y un estator. El rotor lo forma una rueda fónica consistente en una pieza dentada, construida con un material ferromagnético y que gira solidaria con el motor. Por otra parte, el estator está conformado por un imán permanente sobre el que se ha practicado un arrollamiento de un material conductor. De esta forma, al girar el rotor, varía la reluctancia magnética, induciéndose una diferencia de potencial en la bobina.

Este tipo de encendido dispone de una pequeña unidad electrónica de control, muy limitada, pero que le permite procesar la señal del sensor inductivo para actuar sobre el encendido. Con ello, se elimina la necesidad de instalar un ruptor, cuyos contactos estaban sometidos a grandes desgastes y a grandes inercias mecánicas, lo que limitaba el número de revoluciones máximas que podía alcanzar un motor y su fiabilidad. Este sistema aún conservaba el avance de encendido centrífugo y por vacío.

Generador de impulsos de inducción

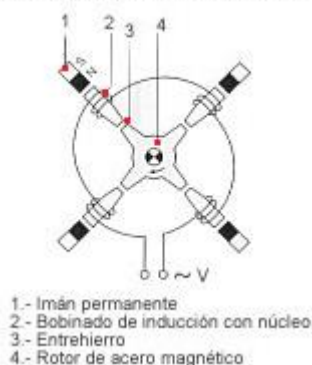


Figura 4.2.3.1. Generador inductivo [14].

4.2.4. Sistema de encendido transistorizado con generador Hall

El sistema de encendido transistorizado con generador Hall fue nombrado por algunos fabricantes como TSZ-H. Surgió después del TSZ-I, pero su funcionamiento es similar. La principal diferencia entre ambos radica en el tipo de sensor utilizado para medir la posición del cigüeñal que, en este caso, se trata de un generador Hall.

Un generador Hall es un tipo de sensor capaz de generar una diferencia de potencial, denominada tensión Hall, cuando se encuentra bajo la presencia de un campo magnético. Desde un punto de vista físico, la tensión Hall es aquella diferencia de potencial producida cuando, a un conductor por el que circulan unas cargas eléctricas, se le somete a la acción campo magnético perpendicular al movimiento de dichas cargas. El campo eléctrico generado será perpendicular al campo magnético y al movimiento de las cargas.

El sensor del sistema de encendido TSZ-H, posee tres elementos: un imán permanente, un sensor Hall, y un obturador. Tanto el sensor Hall como el imán permanente permanecen en una posición estática, mientras que el obturador rota solidariamente con el motor. El obturador está fabricado de un material diamagnético, que posee una reducida permeabilidad magnética. De esta forma, al estar situado entre el imán permanente y el sensor Hall, evita que el campo magnético generado por el imán sea detectado por el sensor Hall. Por otra parte, el obturador dispone de unas aberturas denominadas ventanas. Al girar, el sensor Hall es capaz de detectar estas ventanas, pues cuando una de ellas se alinea con el sensor Hall y el imán permanente, el obturador deja de apantallar y el sensor Hall es afectado por el campo magnético del imán. De esta forma, se puede conocer la posición del cigüeñal. Este sistema también utiliza el avance de encendido centrífugo y por vacío.

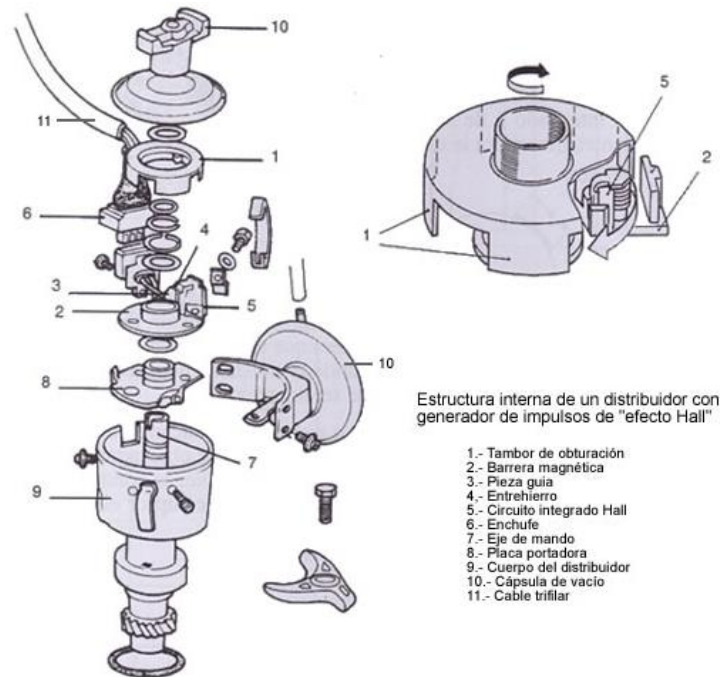


Figura 4.2.4.1. Despiece de un conjunto distribuidor [14].

4.2.5. Encendido electrónico integral

El encendido electrónico integral supuso una mejora respecto a los encendidos TSZ-I y TSZ-H. En él, el avance de encendido se regula electrónicamente, y no mediante sistemas centrífugos o por vacío. Además, se aumentaron el número de sensores. Algunos de esos sensores son:

- Sensor de presión absoluta en el colector de admisión: Sirven para regular el avance de encendido por carga. Fundamentalmente se utilizan sensores piezoeléctricos.
- Sensor de detonaciones: Se trata de un sensor capaz de detectar los autoencendidos (conocidos como picado de biela). Este fenómeno se produce cuando, por una relación de compresión excesiva en la cámara de combustión, una temperatura anormalmente alta, una gasolina de un octanaje inferior al indicado por el fabricante o un fallo en el encendido; la gasolina se deflagra prematuramente. Cuando esto sucede, se genera una fuerza en el pistón, con dirección y sentido hacia el PMI, debido a la combustión de la gasolina durante la etapa de compresión, mientras que la propia inercia del motor (y del vehículo) ejerce una fuerza, en sentido opuesto, es decir, hacia el PMS. Estas dos fuerzas contrapuestas pueden provocar la rotura de la biela, el bulón, el propio pistón, el cigüeñal o los semi cojinetes, entre otros elementos. Por lo tanto, es imprescindible detectar este fenómeno y corregirlo. Este tipo de detonaciones provocan vibraciones en el motor, que pueden ser detectadas mediante un sensor piezoeléctrico ubicado en la parte superior del bloque motor.

- Sensor de temperatura del motor: Los fabricantes instalan, salvo algunas excepciones, termorresistencias NTCs como sensores de temperatura. En este caso se utilizan para regular la temperatura del motor y situarla en 90 °C, actuando sobre la mezcla de aire/gasolina, el electro-ventilador o incluso sobre el propio circuito de refrigeración.
- Sensor de temperatura del aire aspirado: Como se ha mencionado anteriormente, en la mayoría de los sensores de temperatura utilizados, salvo algunas excepciones, se utilizan NTCs. En este caso, el sensor de temperatura es utilizado para medir la temperatura del aire aspirado por el motor, y poder hacer una mejor regulación de la mezcla y del encendido, ya que la velocidad de la combustión dependerá de la cantidad de aire aspirado, y ésta a su vez de la densidad del aire. Cuanto mayor sea la temperatura del aire, menor será su densidad (tenderá a ocupar un mayor espacio) y, por tanto, menor cantidad de aire entrará al motor.
- Posición de la mariposa de gases: La mariposa de gases se utiliza para controlar la entrada de aire al motor. En este sistema de encendido, la mariposa incorpora dos finales de carrera, para detectar si ésta se encuentra a ralentí o a plena carga. En sistemas más complejos se añaden dos potenciómetros que miden la posición exacta de la mariposa.
- Tensión de la batería: Se hace necesario instalar un sensor de tensión de la batería ya que, ésta afecta a los picos de tensión producidos en las bujías.
- Protección sobrepresión del turbocompresor: Se trata de un sensor de presión, generalmente piezoeléctrico, ubicado a la salida del turbocompresor. Su misión es verificar que la presión generada por el turbocompresor no supere un valor crítico ya que resultaría peligroso y podría provocar un autoencendido. Si la presión excediera el valor crítico, se informaría a la unidad de control y se anularía el sistema de encendido hasta bajar de revoluciones al motor, y con ello bajar la presión generada por el turbo.

Además de los sensores explicados, este sistema requiere de un sensor capaz de medir la posición del cigüeñal y las revoluciones del motor. Dicho sensor consiste en un generador inductivo, que funciona de manera similar al explicado anteriormente, con la única salvedad de que, en este caso, el rotor contendrá una rueda dentada ubicada en el volante de inercia. Dicha rueda, posee un diente y un valle más grande que los demás, generalmente ubicados a 90° del PMS (y en algunos modelos un segundo diente y valle ubicados a 90° del PMI), lo que le permite a la ECU sincronizarse con el giro del cigüeñal, y detectar el inicio del ciclo de éste. A partir de ahí, la ECU es capaz de detectar el movimiento angular del motor, gracias a la tensión inducida por el paso de los demás dientes.

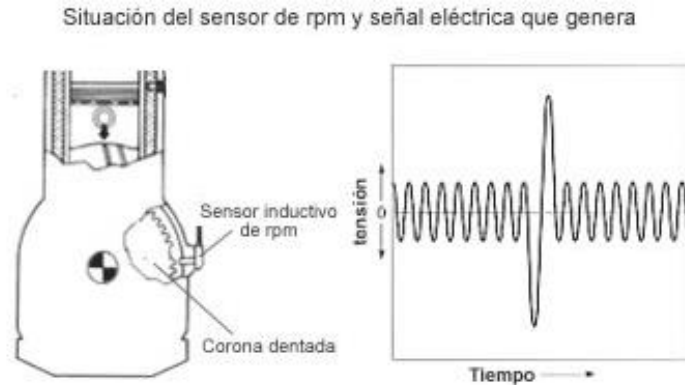


Figura 4.2.5.1. Sensor de posición del cigüeñal [15].

Por otro lado, en el caso de que este sistema se montara en motores de más de un cilindro, se precisa de un distribuidor, ya que este sistema solo utiliza una bobina. Por lo tanto, este sistema de encendido, al igual que los anteriores, se puede clasificar como sistema dinámico, ya que tiene elementos móviles. El control del sistema de encendido se realiza mediante una pequeña unidad de control electrónico.

4.2.6. Encendido electrónico sin distribuidor

También conocido como encendido estático. El control de este sistema es íntegramente electrónico, a través de una ECU. Al eliminar el distribuidor, el sistema presenta mayor fiabilidad y menor mantenimiento. Cabe destacar que el distribuidor actuaba como un switch y que giraba solidariamente con el motor. En función de la posición de su contacto, se enviaba la sobretensión a la bujía correspondiente. El sistema estaba construido por unos contactos móviles de grafito. Dichos contactos, debido al movimiento y a las diferencias de potencial con las que trabajaban, sufrían un elevado desgaste. Por ello, este sistema de encendido supuso una gran mejora al eliminar el distribuidor. Además, permite generar sobretensiones más elevadas, lo que redunda en un mejor encendido.

Existen dos versiones de este sistema de encendido:

- Encendido de chispa perdida: También se le conoce como simultáneo. Fue la primera versión de encendido sin distribuidor que surgió. Este sistema de encendido dispone de una bobina por cada dos cilindros, es decir, por cada dos bujías, las cuales serán alimentadas de manera simultánea. Por lo tanto, las bujías generarán un arco eléctrico al final de las carreras de escape y compresión (cada 360° del cigüeñal). Este sistema otorga una mayor margen de tiempo a las bobinas para generar la tensión disruptiva de las bujías, lo que permite inducir sobretensiones más elevadas y que presentan transitorios de mayor duración. Sin embargo, este sistema presenta el inconveniente de que no puede ser montado en motores con un número de

cilindros impar ni en motores con un cruce de válvulas excesivo, ya que podría causar la deflagración de la mezcla antes de la carrera de compresión.

- Encendido secuencial: Es el sistema más empleado en la actualidad y requiere de una bobina por cilindro. Al instalar una bobina por cilindro, cada una de esas bobinas generará una sobretensión cada 720 grados, por lo tanto, si comparamos este sistema con los anteriores a régimen de revoluciones idéntico, este sistema admite unos transitorios mayores, por lo que se puede generar una sobretensión mayor.

Por lo general, estos sistemas utilizan sensores inductivos o Hall para detectar la posición del cigüeñal, sin embargo, existen variantes en el mercado que utilizan sensores ópticos.

4.3. Sistemas de alimentación

El combustible principal utilizado en un motor Otto es la gasolina. La gasolina es un tipo de hidrocarburo, obtenido a partir de la destilación fraccionada del petróleo. Está compuesta por la mezcla de n-heptano e isooctano. El n-heptano es un compuesto muy sensible (se requiere de un aporte energético de pequeña magnitud para iniciar la combustión), mientras que el isooctano es muy insensible, lo que le confiere la capacidad de resistir a la compresión sin iniciar la deflagración. El octanaje de una gasolina indica el porcentaje, en volumen, de isooctano respecto al volumen total. Actualmente se añaden aditivos, como el metil tert-butil éter (MTBE), que mejora la resistencia a la compresión, sin detonar, del combustible para evitar el autoencendido. También se añaden aditivos anticorrosivos, detergentes, antiemulsionantes, modificadores de fricción y estabilizantes para mejorar las prestaciones del motor y su vida útil [9].

El sistema de alimentación es el encargado de realizar la mezcla de aire y combustible. Esta mezcla debe respetar una relación aire-combustible para que, durante el momento de la combustión, se consuman sus dos reactivos: la gasolina y el oxígeno. Se conoce como dosado (Air-Fuel Ratio o AFR) al coeficiente resultante de dividir la masa de aire entre la masa de combustible utilizada en la combustión. Este coeficiente indica la relación de aire y combustible.

$$AFR = \frac{m_a}{m_c} \quad (\text{Ec. 4.3.1})$$

El valor AFR estequiométrico (AFR_e) es aquél en el que se consumen totalmente los dos reactivos, y está situado en 14,7. El coeficiente λ resulta de dividir el AFR entre el AFR_e e indica si una mezcla es rica en combustible ($\lambda < 1$) o si es pobre ($\lambda > 1$).

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_e} = \frac{1}{AFR_e} \cdot \frac{m_a}{m_c} \quad (\text{Ec. 4.3.2})$$

El dosado dependerá de las condiciones de marcha requeridas. En aceleraciones y en aquellos momentos en los que se requiere una mayor carga al motor, el dosado disminuirá ($\lambda < 1$). Cuando el valor de λ se sitúa en torno a 0.9, es cuando se obtiene la mayor potencia calorífica del combustible. Por otro lado, cuando la mezcla se empobrece hasta $\lambda \approx 1,5$ es cuando se obtiene el menor consumo. Un sistema de alimentación debe ser capaz de regular la mezcla de manera óptima, y adaptarla a las condiciones de funcionamiento requeridas [16].

Al igual que con los sistemas de encendido, en los sistemas de alimentación existen diferentes tecnologías. Estas tecnologías son presentadas a continuación por orden cronológico, y en ellos se puede observar como la electrónica ha ido ganando cada vez más peso, permitiendo obtener sistemas más eficientes y precisos.

4.3.1. Carburador

En los motores atmosféricos (sin turbocompresor), la presión en el colector de admisión es inferior a la atmosférica debido al flujo de aire entrante al motor. Cuanto mayor sea el régimen de revoluciones del motor, mayor será el caudal de aire que circula por él y, dado que la sección del colector de admisión es fija (obviando los sistemas de admisión variable modernos), mayor será la velocidad con la que el aire que ingresa al motor. Esto se traduce en una reducción de la presión en el interior del colector. Aplicando el teorema de Bernoulli se obtiene la siguiente expresión:

$$\Delta P = -\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta v^2 \quad (\text{Ec. 4.3.1.1})$$

Donde P es la presión, ρ es la densidad del aire y v la velocidad.

El carburador es un elemento ubicado en la entrada del colector de admisión que, aprovecha el vacío generado por la circulación del aire, para regular la mezcla de aire y gasolina en la admisión, a través de un Venturi.

El carburador dispone de un elemento de bombeo, que se acciona en plena carga, y que permite verter una mayor cantidad de combustible al colector, enriqueciendo la mezcla.

El carburador fue uno de los primeros sistemas en aparecer que permitía regular la mezcla de aire y combustible. Sin embargo, debido a su falta de precisión y eficiencia, esta tecnología quedó obsoleta, salvo en motores de pequeña cilindrada.

4.3.2. Inyección indirecta mecánica

También conocida como K-Jetronic (Kontinuierlich-Jetronic o inyección continua). Surgió con la finalidad de reducir el consumo, las emisiones y mejorar el rendimiento del motor respecto al sistema de carburación. Este tipo de inyección se clasifica dentro de la indirecta y multipunto, lo cual quiere decir que incorpora un inyector por cilindro, en el colector de admisión, y no en la cámara de combustión.

El sistema contiene una bomba de combustible, que hace llegar la gasolina hasta un regulador de caudal o dosificador. Dicho regulador está formado por una válvula, controlada mecánicamente a través de un disco situado en el colector de admisión. Este disco es movido por el aire que circula a través del colector de admisión. De esta forma, el sistema de inyección es capaz de regular la cantidad de combustible inyectada en función del caudal de aire que circula por el colector de admisión.

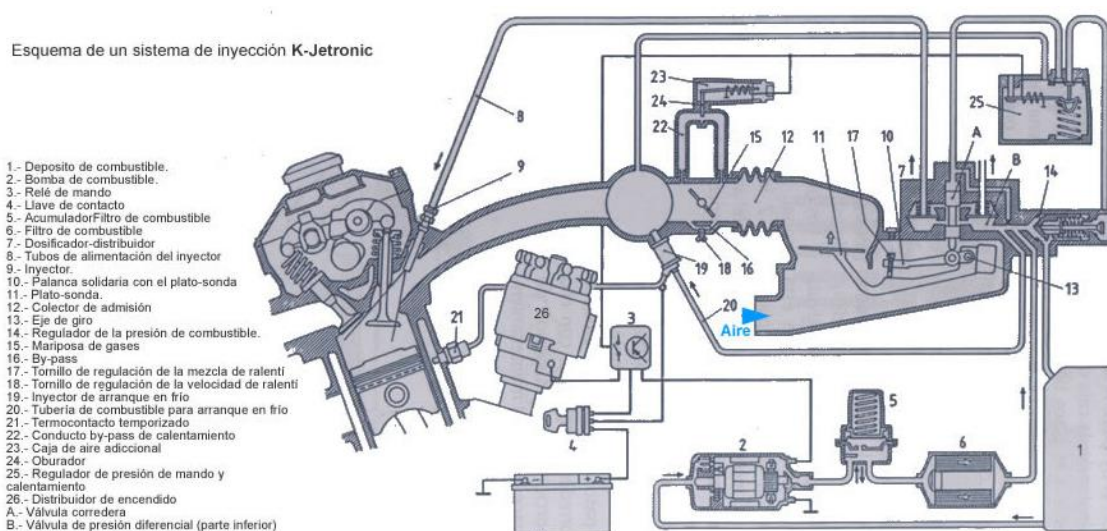


Figura 4.3.2.1. Inyección mecánica [17].

El regulador envía el combustible a los inyectores. Los inyectores, contienen unas válvulas que permiten el paso de combustible al colector de admisión. También contienen unos resortes que mantienen cerradas estas válvulas en condiciones de reposo. Sin embargo, en condiciones de marcha, la presión existente en el sistema de inyección incide sobre las válvulas, y éstas vencen la fuerza de los resortes abriendo el paso de combustible hacia el colector. Por tanto, como los inyectores se abren por el efecto de la presión del sistema, a este sistema se le denomina inyección mecánica.

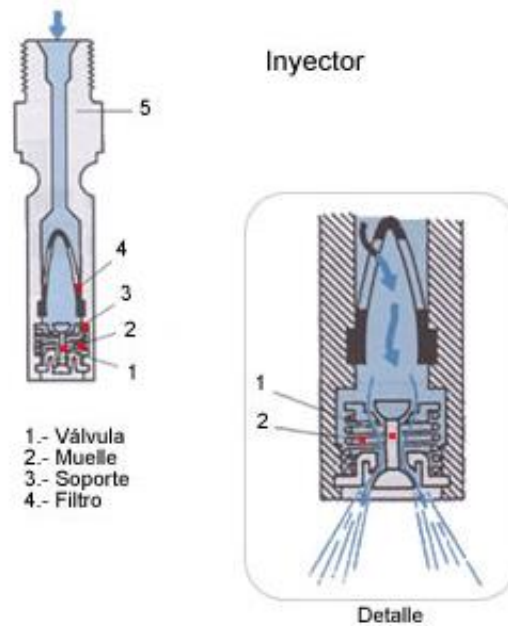


Figura 4.3.2.2. Inyector mecánico [17].

El uso de inyectores supuso notables mejoras en el rendimiento de los motores. El principal motivo es debido a que un inyector es capaz de pulverizar mejor el combustible, gracias a lo cual, la mezcla de aire y combustible es más homogénea.

4.3.3. Inyección electrónica monopunto

Fue el primer sistema de inyección electrónica en surgir. Está compuesto por un único inyector, alojado en el colector de admisión (previa a la mariposa de gases), y que suministra gasolina a todos los cilindros.

El sistema incorpora una sonda lambda, capaz de medir la concentración de oxígeno en los gases de escape y, a través de ella, regular la concentración de combustible en la mezcla; por lo tanto, se puede considerar como un sistema realimentado negativamente.

La concentración de oxígeno en el aire por unidad de volumen que aspira el motor, dependerá de la presión y de la temperatura de este gas en el colector de admisión. Por tanto, para efectuar una mejor regulación de la mezcla, este sistema incorpora en el colector de admisión un sensor manométrico y una termorresistencia, generalmente NTC; encargados de medir la presión y la temperatura respectivamente. Además, se incorpora una segunda termorresistencia, también NTC, dedicada a medir la temperatura del líquido refrigerante. En caso de que el motor tenga una temperatura inferior

a la de funcionamiento (aproximadamente 90 °C), el sistema enriquece la mezcla con el fin de alcanzar dicha temperatura con mayor celeridad.

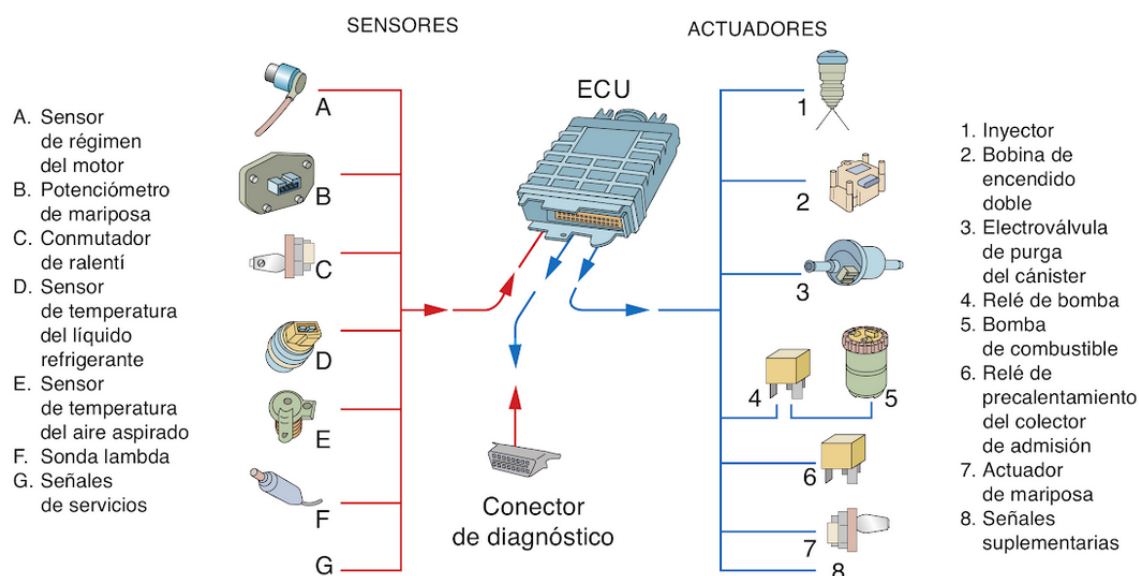


Figura 4.3.3.1. Inyección monopunto [18].

La inyección monopunto contaba con una ECU, basada en una memoria PROM que, además de encargarse de regular el caudal de gasolina inyectado, también controlaba la fase de apertura del inyector. Para ello, se ayudaba de un sensor inductivo o un sensor Hall que monitorizaba la posición del cigüeñal, un segundo sensor que medía las revoluciones del motor y un último sensor, formado por dos potenciómetros, que detectaba la posición de la mariposa de gases.

4.3.4. Inyección indirecta electrónica multipunto

La inyección indirecta multipunto supuso un nuevo avance en la tecnología de inyección. Los motores que incorporaban este sistema disponían de un inyector por cilindro, alojados en el colector de admisión (después de la mariposa de gases). Dependiendo de la tecnología, la inyección se realizaba de manera simultánea (todos los inyectores se activaban a vez), semisecuencial (los inyectores se activaban por parejas) o secuencial.

El control y la regulación de la inyección multipunto es similar al de la monopunto. Se realiza electrónicamente, y la única diferencia estriba en que este sistema cuenta con un mayor número de sensores, que le permite optimizar mejor el funcionamiento del sistema.

4.3.5. Inyección directa

La inyección directa es un tipo de inyección electrónica en la que la gasolina es mezclada con el aire en el interior de la cámara de combustión. El sistema contiene una bomba que puede suministrar hasta 100 bares de presión de gasolina a los inyectores. Inyectar combustible a alta presión repercute en una mejor pulverización de éste y, por tanto, en una mezcla más homogénea.

El funcionamiento de este sistema es similar a los anteriores. El motor dispone de una serie de sensores, que informan a la ECU de variables físicas como la temperatura del motor, la cantidad de aire aspirado, la posición del acelerador, la posición del cigüeñal o el régimen del motor. En función de estas variables, la ECU controla los tiempos de inyección y el caudal de gasolina inyectada.

La ECU es programada con una matriz de M filas y N columnas, en donde se fija el tiempo que debe permanecer el inyector abierto y, con ello, el caudal inyectado, en función de la carga y del régimen del motor. Este concepto es aplicable para fijar otros conceptos ya mencionados como el avance de encendido. Las matrices pueden ser representadas gráficamente como se muestra a continuación.

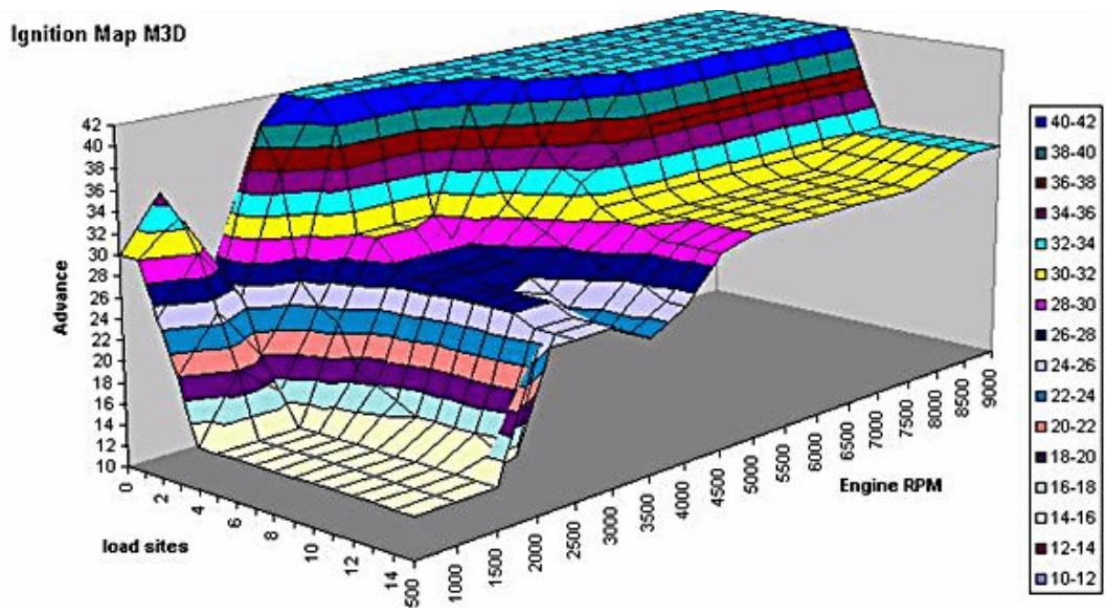


Figura 4.3.5.1. Mapa de encendido.

Representación del ángulo de avance de encendido [19].

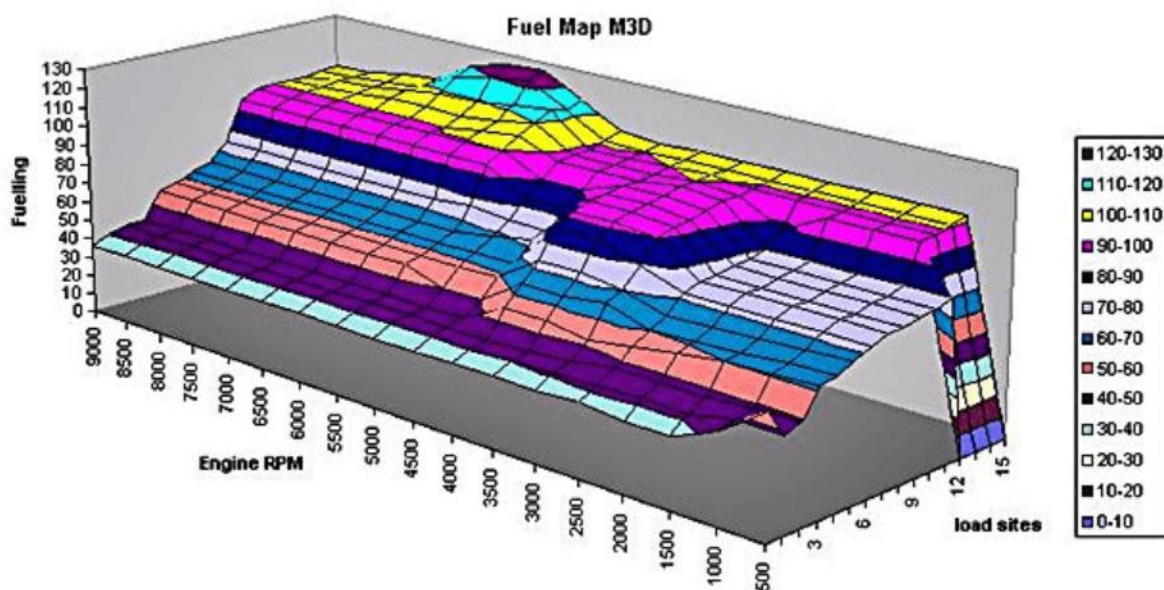


Figura 4.3.5.2. Mapa de inyección.
Representación del tiempo de apertura del inyector [19].

5. Posibles soluciones

Existen una infinidad de opciones encaminadas a desarrollar este proyecto y, a medida que avanza la tecnología, las opciones disponibles en el mercado se multiplican. En este apartado se valorarán algunas soluciones que se han tenido en cuenta durante la fase de desarrollo y prototipado, y se describirán brevemente sus ventajas e inconvenientes.

5.1. Microcontrolador

Durante el desarrollo del prototipo de pruebas, se han estudiado diferentes opciones de diseño. Una de ellas, consistía en utilizar dos microcontroladores: uno encargado de controlar la inyección y otro encargado de controlar el encendido, para reducir la carga de trabajo de éstos y estableciendo una comunicación I2C entre ambos, con la finalidad de que compartieran los datos de los sensores de temperatura del motor y acelerador.

Otra opción valorada fue la de utilizar un único microcontrolador. Esta opción entrañaba algunas ventajas e inconvenientes que se debían de tener en cuenta. Al utilizar un único microcontrolador, reducimos el coste del proyecto además de la probabilidad de fallos. También este diseño permitiría fabricar una PCB de menores dimensiones facilitando así la miniaturización. Sin embargo, se debe seleccionar un microcontrolador con la suficiente memoria como para almacenar el código, con los mapas de inyección y encendido, y con la suficiente velocidad de reloj como para no producir un cuello de botella durante la ejecución.

5.2. Pantalla LCD

Otro aspecto a tener en cuenta es la elección de la pantalla LCD, y los tipos de comunicación posibles entre el microcontrolador y la propia pantalla. En el mercado existen diferentes tipos de pantallas LCD, en función del tamaño y del tipo de datos que se pueden escribir en ellas. Para este proyecto se han valorado pantallas de 16x2 caracteres, de 20x2 caracteres y pantallas LCD gráficas; tanto de color azul como verde.

Las pantallas LCD presentan diferentes alternativas de conexión. Una de las más populares es mediante comunicación I2C. De esta forma, solo se requeriría de la utilización de los pines SDA y SCL del microcontrolador (más los de alimentación). Sin embargo, sería necesario instalar un módulo I2C en la pantalla. Las otras dos opciones son mediante un bus de comunicación de 4 pines o de 8 pines.

Para gobernar la pantalla se han estudiado dos alternativas; utilizar un encoder rotativo o instalar un pulsador conectado a una resistencia pull-up.

5.3. Sensor de revoluciones y de posición del motor

El motor debe contar con un sensor capaz de medir las revoluciones del motor y la posición del cigüeñal. Como se ha mencionado en los capítulos predecesores, en el mercado existen diferentes tecnologías que aportan diferentes grados de precisión y de fiabilidad. En la actualidad, uno de los más extendidos es el sensor inductivo. Se ha valorado utilizar un sensor de estas características instalado en el cigüeñal, en las proximidades del volante de inercia. El volante de inercia, al contener una rueda dentada, será capaz de generar pulsos en dicho sensor. No obstante, si se aceptara como válida esta solución, sería imprescindible incorporar un segundo sensor, alojado en el árbol de levas, mediante el cual se pudiera distinguir entre la primera vuelta del ciclo del motor y la segunda, para conocer fielmente el momento del ciclo Otto en el que se encuentra el motor.

5.4. Acelerador

En automoción se acostumbra a usar un potenciómetro dual como sensor de acelerador. El potenciómetro es montado en el pedal del acelerador o en la mariposa de gases, en tecnologías más antiguas. La razón por la cual se utiliza un potenciómetro dual, es porque de esta manera, se dota al sistema de redundancia y, por ende, de seguridad. Las consecuencias de un fallo en el acelerador en un momento crítico de la conducción, como un adelantamiento, pueden ser fatales. El sensor proporciona dos señales inversamente proporcional la una a la otra. Sin embargo, es conveniente valorar otras opciones, puesto que este proyecto trata de la elaboración de un prototipo de pruebas para experimentar en el laboratorio, antes de la ejecución de una versión destinada a ser instalada en un motor real. Si se utilizara un potenciómetro de una única pista, se abarataría y se simplificaría el diseño.

En el mercado existen multitud de potenciómetros diferentes, pero se ha creído conveniente descartar de manera imperiosa, todos aquellos que tienen una respuesta no lineal, con el fin de simplificar la circuitería. También se han valorado diferentes valores óhmicos del potenciómetro, y diferentes localizaciones de su actuador (horizontal y vertical).

5.5. Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura utilizados en los vehículos suelen ser, en la mayoría de los casos, termistores NTC. Estos sensores presentan una respuesta no lineal y, por ello, deben ser instalados en algún tipo de circuitería que linealice su respuesta como, por ejemplo, en un puente de Wheatstone haciendo pasar la señal de salida por un amplificador operacional de instrumentación. Esta opción sería una de las más válidas para este tipo de aplicación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este proyecto va más encaminado al desarrollo de un prototipo de pruebas y, por ende, se puede sustituir el sensor de temperatura por otro elemento sobre el cual se pueda actuar de forma directa. Por tanto, el elemento estudiado es nuevamente un potenciómetro. Gracias a él se podrían simular las respuestas del motor en función de la temperatura a la que se encuentre. El análisis de las diferentes opciones de potenciómetros disponibles es idéntico al del acelerador.

5.6. Testigo de temperatura

Se ha creído conveniente instalar un testigo luminoso que advierta sobre el estado de temperatura del motor. Dicho testigo, se iluminará en el caso de que la temperatura sea anormalmente alta, arrojando un mensaje de peligro. En todos los vehículos actuales, este tipo de testigos se realizan a partir de un LED y hay que remontarse a tiempos muy pasados para encontrar bombillas incandescentes (opción que ha quedado descartada inmediatamente). Lo que sí ha supuesto motivo de análisis es el modo de activación del LED, y se han estudiado dos alternativas: utilizar un transistor como driver o que la alimentación del LED provenga directamente del microcontrolador.

5.7. Sistema de inyección

El inyector de gasolina de un motor de gasolina puede estar alimentado con 5 V o con 12 V, pero se debe tener en cuenta que, si se opta por alimentar al inyector con 12 V, se puede aprovechar la tensión de la batería, mientras que, si se alimentara con 5 V, la tensión procedería del regulador de tensión. Esto es un factor importante y que debe ser tenido en cuenta puesto que el regulador de tensión debe ser capaz de aportar la suficiente corriente como para alimentar a toda la PCB y al inyector.

Por otro lado, el microcontrolador debe gobernar el inyector a través de un transistor. El dilema estriba en si también es necesario interponer un optoacoplador, con la finalidad de aislar el circuito de control del propio inyector. Cabe recordar que un inyector está formado por una bobina que, aunque las sobretensiones generadas durante el cierre éste, momento en el cual se deja de alimentar la bobina, vayan a ser eliminadas mayoritariamente por un diodo, este proceso puede generar ruido en las

señales con las que trabaja el microcontrolador. Además, la unidad de control electrónico trabajará en ambientes muy adversos en los que el cableado del inyector podría absorber radiación electromagnética.

5.8. Sistema de encendido

Durante el encendido se precisa de la generación de una tensión con picos de varios miles de volts. Por ello, se hace imprescindible aislar el circuito interponiendo un optoacoplador, para limitar el impacto del ruido generado por la desconexión de la bobina.

Para generar una tensión tan elevada en el secundario de la bobina, es necesario suministrar al primario una corriente relativamente grande. Por ello, se han contemplado dos alternativas: utilizar un transistor IGBT o utilizar un transistor BJT de potencia a la salida del optoacoplador. Ambas opciones se han considerado válidas para esta aplicación. Este dilema también se ha tenido a la hora de elegir el tipo de optoacoplador.

5.9. Comunicaciones

En el mercado existen multitud de microcontroladores, que ofrecen diferentes tipos de comunicaciones. Dado que se desea conectar el prototipo de pruebas a un smartphone y a un ordenador, se han considerado como las más viables, la comunicación serie con un módulo bluetooth, para conectarse con el móvil, y Ethernet o USB para conectarse con el ordenador.

La comunicación por Ethernet está más extendida en la industria que la comunicación USB. Permite una mayor escalabilidad hasta el punto de que se podrían conectar multitud de dispositivos, bajo el protocolo TCP/IP, en la que los elementos conectados dispusieran de diferentes jerarquías en función de la red a la que estuvieran conectados. Por el contrario, los estándares de la IE3 (802.3 CSMA/CD) establecen que este sistema empleará una codificación Manchester, lo que implica trabajar con tensiones positivas y negativas. Esto también sucede en la comunicación USB.

También se ha valorado la opción de establecer una comunicación serie, bajo el estándar RS232 [40]. Es un tipo de comunicación que también requeriría de un driver para adaptar las tensiones del bus. Sin embargo, aunque es un tipo de comunicación muy sencilla de establecer, actualmente está quedando obsoleta.

6. Soluciones escogidas

En este capítulo se detallará, de forma clara y concisa, las soluciones escogidas para llevar a término el prototipo de pruebas. Dichas soluciones han sido extraídas de las diferentes alternativas descritas en el apartado anterior.

6.1. Alimentación

La alimentación del circuito proviene de una batería de coche. Las baterías de coche son generalmente de plomo ácido y presentan una tensión nominal de 12 V. La bobina de encendido y el inyector serán alimentados por esta batería, de forma directa. Sin embargo, el microcontrolador, la pantalla LCD, los diferentes sensores que se han incorporado o los integrados, requieren una tensión de alimentación de 5 V. Por esta razón, se ha instalado un regulador de tensión (7805UC), junto con un condensador de 330 nF acoplado a su entrada y otro de 100 nF alojado en la salida del regulador, para obtener así una señal de 5 V filtrada, mediante dos filtros pasa-bajos.

6.2. Microcontrolador

Se ha optado por incluir un único microcontrolador para realizar la labor de control. Los motivos que han llevado a la toma de esta decisión son que, al utilizar un único microcontrolador, se reduce el número de componentes instalados en la placa y, con ello, también se reduce el coste del proyecto y la probabilidad de fallos; y se aumenta la miniaturización. Cabe recordar que, de lo contrario, no solo habría que duplicar el microcontrolador, sino que también habría que duplicar todos los elementos que éste lleva aparejados como, por ejemplo, el oscilador.

Sin embargo, utilizar un único microcontrolador entraña una serie de consideraciones que deben ser tenidas en cuenta, a la hora de seleccionar el modelo. La marca de microcontroladores escogida ha sido Microchip puesto que, al ser una de las más utilizadas, existe una amplia comunidad de desarrolladores. Esto facilita las labores de documentación y aporta transparencia. Del mismo modo, una de las consideraciones más importantes a la hora de escoger una familia de microcontroladores, es el número de interrupciones y temporizadores requeridos. Tal y como se verá en capítulo destinado al software de microcontrolador, han sido necesarios 4 temporizadores. Por ello, se han desechado los microcontroladores de la familia 16F, y se ha optado por incorporar uno de la familia 18F.

Key Features	PIC16F873A	PIC16F874A	PIC16F876A	PIC16F877A
Operating Frequency	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz	DC – 20 MHz
Resets (and Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)	POR, BOR (PWRT, OST)
Flash Program Memory (14-bit words)	4K	4K	8K	8K
Data Memory (bytes)	192	192	368	368
EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	256
Interrupts	14	15	14	15
I/O Ports	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C	Ports A, B, C, D, E
Timers	3	3	3	3

Figura 6.2.1. Datasheet de la familia de microcontroladores 16F [20].

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4

Figura 6.2.2. Datasheet de la familia de microcontroladores 18F [21].

Del mismo modo, la familia de microcontroladores 18F admite una velocidad de reloj de hasta 48 MHz, frente a los 20 MHz de los microcontroladores de la gama 16F. Esto es otro aspecto fundamental porque la lectura del sensor de revoluciones se va a programar mediante interrupciones, y es preciso realizar múltiples cálculos entre interrupción e interrupción. Una frecuencia de reloj baja podría propiciar que, en regímenes de revoluciones altos, el tiempo disponible para realizar estos cálculos no fuera lo suficientemente grande, lo que abocaría a que se ejecute una nueva interrupción antes de haber concluido la rutina de la interrupción anterior y, por ende, aparezcan errores. Esto es un error que se ha cometido durante el diseño del proyecto, y por ello, se ha optado por un microcontrolador de la gama 18F a una frecuencia de 48 MHz.

Además de lo mencionado, la gama 18F se fabrica con una memoria de mayor capacidad que la gama PIC16F. Y esto es otro punto a favor de los microcontroladores 18F ya que el software del microcontrolador debe albergar los mapas de encendido e inyección.

El último aspecto que se ha tenido en cuenta es el ADC. En el caso de la familia 18F, los microcontroladores cuentan con ADCs de 10 bits, lo que se traduce en una sensibilidad suficiente para la aplicación requerida (como los sensores van a proporcionar una salida de entre 0 V y 5 V, el microcontrolador va a tener una sensibilidad de menos de 5 mV y de menos de 0,3 ° en el caso de los potenciómetros).

Dentro de la familia de microcontroladores existen múltiples opciones. En este caso, se ha optado por el modelo 18F2550 ya que cuenta con un puerto de 7 pines y dos de 8 pines (23 pines en total de los cuales se han utilizado 19) y con módulos de comunicación serie.

6.3. Pantalla LCD

Se ha optado por instalar una pantalla LCD de 16x2 caracteres. La pantalla gráfica ha sido descartada porque solo se requería mostrar texto. Por otro lado, la pantalla de 20x2 caracteres se ha desestimado ya que, las cadenas de texto que se desean mostrar caben perfectamente en una pantalla de 16x2. Pese a que se tenía preferencia por las pantallas LCD azules, se ha tenido que elegir una verde por falta de stock en la empresa suministradora.

La transmisión de datos entre el microcontrolador y la pantalla se realiza a través de un bus de 4 conexiones. La opción de un bus de 8 conexiones ha sido desestimada por falta de pines libres en el microcontrolador mientras que la opción de establecer una comunicación I2C se ha rechazado para ahorrar el coste de instalar un módulo I2C en el display.

6.4. Acelerador

El acelerador consiste en un potenciómetro lineal. La opción del potenciómetro de doble pista, con dos señales de salida, ha sido desechada para reducir costes y simplificar el proyecto. Sin embargo, debería añadirse algún tipo de redundancia en el caso de que este potenciómetro fuera a ser instalado en un motor real.

En el mercado existen diferentes modelos de potenciómetros. Para esta aplicación, se ha preferido utilizar un potenciómetro de un valor óhmico elevado (de 100 kΩ), para reducir la corriente, y con ello el consumo de este sensor. Por otro lado, la manera de actuar sobre el potenciómetro elegido es vertical, ya que de esta forma se facilita su manipulación en la versión de prototipo de pruebas.

6.5. Sensor de temperatura

Se ha optado por sustituir la NTC, que se debería montar en una aplicación real, por un potenciómetro lineal, con el fin de estudiar más fácilmente cómo responde un motor en función de la temperatura a la que se encuentra el mismo. El potenciómetro es idéntico que el del acelerador, un potenciómetro lineal de 100 kΩ y de ajuste vertical. Al utilizar un potenciómetro lineal, se simplifica el circuito ya que no requiere linealizar la salida del sensor.

6.6. Testigo de temperatura

Se ha utilizado un diodo LED de color rojo y 3 mm como testigo luminoso. Dado que este LED consume 20 mA y el microcontrolador puede aportar 25 mA, se puede gobernar el Led sin la necesidad de instalar un transistor. No obstante, sí que es necesario instalar una resistencia limitadora de corriente. Según la página web del suministrador de este dispositivo [22], el LED presenta una caída de tensión de 2,4 V en su etapa de conducción. Por tanto, la resistencia que se deberá instalar será de al menos 130 Ω.

$$R = \frac{5-2,4}{20 \cdot 10^{-3}} = 130 \, \Omega \quad (\text{Ec. 6.6.1})$$

6.7. Sistema de inyección

A diferencia del encendido, el inyector, pese a alojar una bobina en su interior, no genera grandes sobretensiones, ya que el valor de su inductancia es más pequeño. Además, se va a instalar en antiparalelo un diodo encargado de filtrar las corrientes autoinducidas generadas durante el cierre del inyector. Por ende, no se ha considerado imprescindible incorporar un optoacoplador, para gobernar la apertura y cierre del inyector. No obstante, no hay que olvidarse de que el diseño que se está realizando corresponde a un prototipo de pruebas que va a ser utilizado en laboratorio y que, en la versión final, la cual iría montada en motores y trabajará en ambientes adversos y cambiantes, se deberá incorporar un optoacoplador como elemento de protección. El diodo utilizado se identifica con la referencia BY255 y soporta picos de hasta 100 A.

Del mismo modo, se ha determinado que la alimentación del inyector provenga directamente de la batería, es decir, de 12 V. La razón de esta decisión viene motivada porque, de esta forma, se requiere de una carga de trabajo inferior del regulador de tensión. El regulador elegido (7805UC) puede aportar, como máximo, 1 A. También, de esta manera, se reduce la temperatura de trabajo de regulador y, por tanto, se aumenta la eficiencia del circuito.

6.8. Sistema de encendido

El sistema de encendido requiere de una tensión entre los electrodos de la bujía, que contenga picos de varios miles de volts. Para ello, el circuito contiene una bobina de encendido, la cual alberga un transformador en su interior con una relación de espiras de 1:1000, y un transistor que interrumpe la alimentación en el primario de la bobina de encendido, produciendo la variación de flujo electromagnético requerida. Tanto la bujía como la bobina vienen impuestas en este proyecto.

Debido a la magnitud de las señales con las que se trabaja, se ha creído conveniente instalar un optoacoplador entre el microcontrolador y la base del transistor, con la finalidad de aislar eléctricamente los circuitos. El optoacoplador utilizado es el 4N25, y su circuito de potencia puede aportar 50 mA en modo continuo, y picos de hasta 100 mA. En el transcurso del proyecto, se ha estudiado la posibilidad de utilizar otro optoacoplador, identificable con la referencia HCPL3120 y, cuyo circuito de potencia contaba con un transistor IGBT, que podía soportar picos de hasta 2,5 A. Sin embargo, su uso ha sido desestimado, ya que requería de tensiones de alimentación de hasta 30 V. El LED del optoacoplador 4N25 requiere de una corriente de hasta 60 mA. Como el microcontrolador solo puede aportar 25 mA, se ha incluido un transistor como driver, identificable con la referencia BD139.

El transistor encargado de cortar la alimentación de la bobina es el 12N60A4. Se trata de un transistor IGBT que puede soportar corrientes de hasta 54 A, en modo continuo, y tensiones de hasta 390 V entre los terminales del colector y emisor. Se ha conectado una resistencia de 10 Ω a la compuerta del mismo. De esta forma, según los datos recopilados del datasheet, se obtienen tiempos de apertura inferiores a 17 ns, lo cual es suficiente para la aplicación requerida. El transistor IGBT va a estar controlado por el optoacoplador, junto con una resistencia pull-down de 5,6 k Ω conectada a su salida.

6.9. Comunicaciones

Se quiere implementar la opción de poder comunicar la unidad de control electrónico con un smartphone y un ordenador. Se ha creído conveniente realizar la conexión entre el ordenador y la ECU, mediante un USB. Sin embargo, esta opción ha tenido que ser descartada por un problema de compatibilidad de los drivers de Windows a la hora de ejecutar las simulaciones. Por ello, se ha optado por utilizar una comunicación serie, bajo el estándar RS232[40]. No obstante, se deberá incluir un integrado que adapte las tensiones del microcontrolador al estándar RS232. El integrado seleccionado es el MAX232 y convierte los valores de tensión de la señal al estándar RS232 a través de unos condensadores de 1 μ F.

7. Diseño del prototipo de pruebas

Para desarrollar el hardware se ha utilizado el software Proteus. Proteus integra un programa de desarrollo electrónico, conocido como ISIS (Intelligent Schematic Input System), el cual permite crear y simular circuitos digitales. Por otro lado, Proteus también contiene una herramienta, denominada ARES (Advanced Routing and Editing Software), con la que se pueden diseñar placas de circuito impreso. Por lo tanto, Proteus permite desarrollar, de manera simultánea, los esquemas eléctricos y la placa de circuito impreso, al tiempo que se simulan los circuitos. Por este motivo, se ha elegido Proteus como herramienta de diseño y simulación de este proyecto. A continuación, se expone el diagrama de bloques que resumirá la constitución de la unidad de control electrónico.

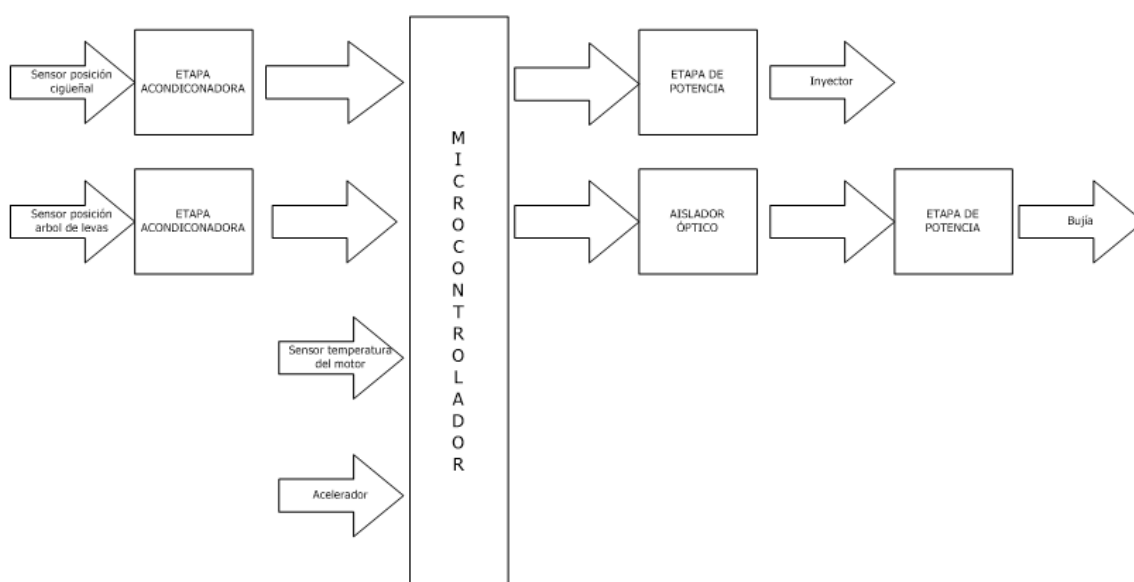


Figura 7.1. Diagrama de bloques del prototipo (fuente: propia).

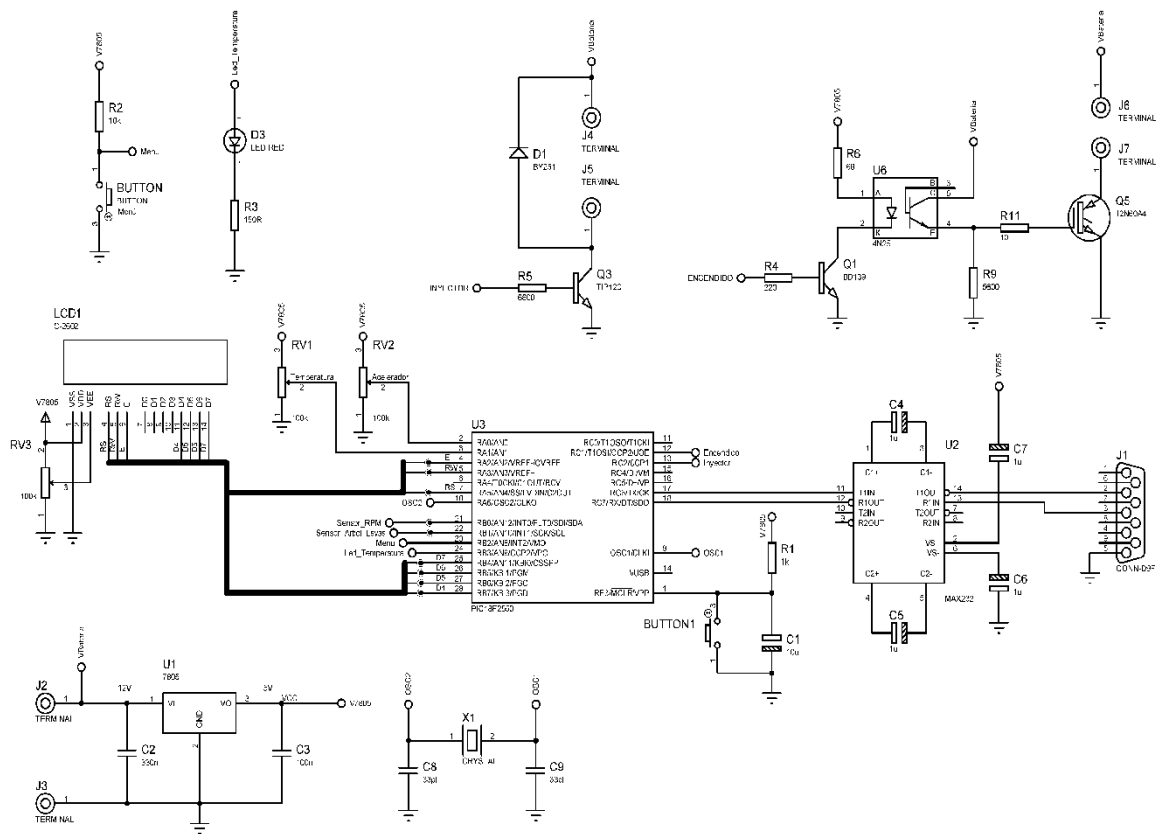


Figura 7.2. Esquema eléctrico (fuente: propia).

7.1. Alimentación

El circuito va a estar alimentado por una batería de plomo ácido de 12 V. Esta batería va a alimentar, de forma directa, al circuito de potencia del encendido y al de la inyección. En el caso de que el motor se encuentre encendido, la tensión de alimentación provendrá del alternador y podrá superar los 14 V. Por otro lado, la electrónica de control precisa de una alimentación de 5 V. Por ello, se ha precisado incorporar un regulador de tensión con el fin de alimentar al microcontrolador, y a toda la circuitería de control. Tal y como se ha mencionado en el apartado anterior, el regulador elegido es el 7805UC, y se le ha acoplado un condensador de 330 nF a la entrada, y uno de 100 nF a la salida. A continuación, se muestra el esquema de conexionado.

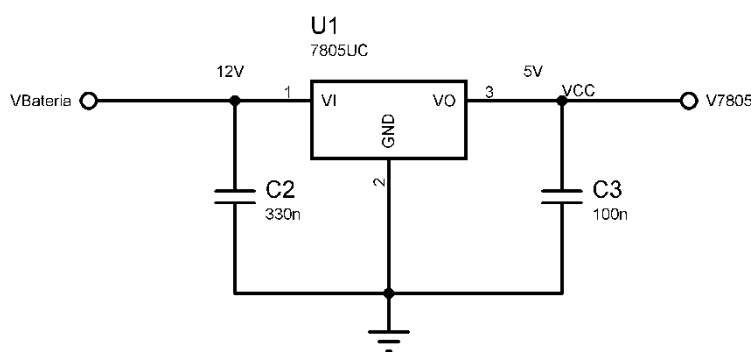


Figura 7.1.1. Esquema del regulador de tensión (fuente: propia).

Implementando este circuito, se obtienen 5 V a la salida.

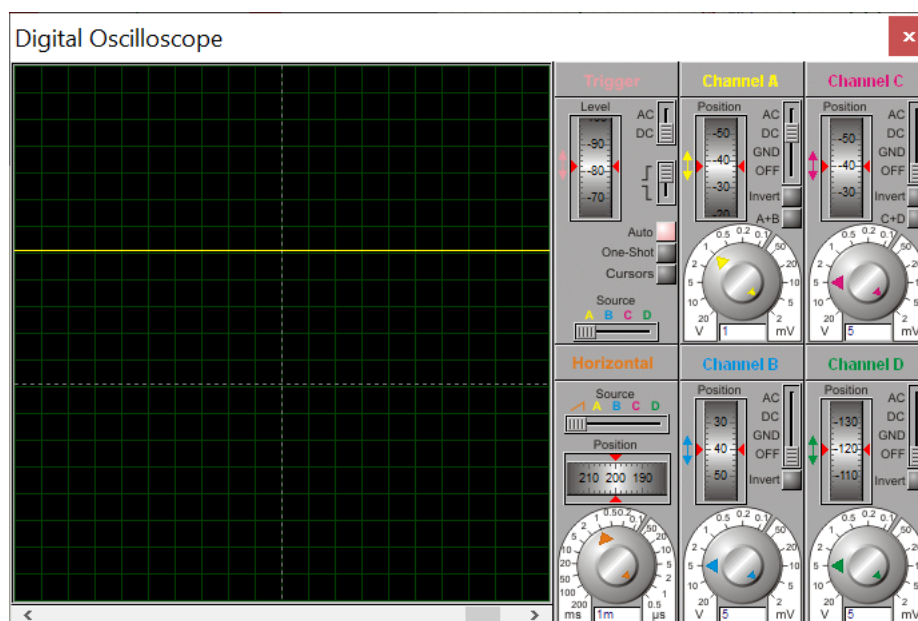


Figura 7.1.2. Simulación de la salida del regulador de tensión (fuente: propia).

7.1.1. Cálculo del disipador

Para efectuar los cálculos del disipador del regulador de tensión, se ha contemplado el supuesto más desfavorable, que es que la tensión provenga del alternador. Se ha estimado que, de darse este caso, la tensión de entrada al regulador de tensión estaría situada en 14 V. El regulador de tensión debe ser capaz de convertir los 14 V en 5 V y, a su vez, suministrar los 225,7 mA que consume el circuito de control de la ECU. Con estos datos, se ha calculado que el regulador disipa una potencia de 2,03 W.

$$P_{dis} = (V_{bateria} - 5) \cdot I_{control\ ECU} \quad (\text{Ec. 7.2.1.1})$$

$$P_{dis} = (14 - 5) \cdot 0,2256 = 2,03\ W \quad (\text{Ec. 7.2.1.2})$$

El regulador elegido utiliza el encapsulado TO-220. Con este encapsulado, la resistencia térmica entre la unión y el ambiente está situada en 19 °C/W. Por tanto, considerando que, al estar en las proximidades del motor, el regulador puede estar sometido a una temperatura puede alcanzar 90 °C; la temperatura de la unión será de 128 °C.

$$T_j = P_{dis} \cdot R_T + T_{amb} \quad (\text{Ec. 7.2.1.3})$$

$$T_j = 2,03 \cdot 19 + 90 \quad (\text{Ec. 7.2.1.3})$$

La temperatura de máxima de la unión que indica el fabricante, se sitúa en 150 °C. Por tanto, no se necesitará disipador para trabajar dentro del área de operación segura (safe operating area).

7.2. Microcontrolador

Se ha optado por utilizar el microcontrolador PIC18F2550. Uno de los aspectos más importantes es la velocidad del clock. El modelo con el que se ha trabajado admite velocidades de hasta 48 MHz. A lo largo del desarrollo del proyecto, se han probado diferentes velocidades de reloj, pero se ha concluido que la velocidad más alta es la máxima.

Inicialmente se probó utilizar una velocidad de 4 MHz, ya que se consideró una frecuencia aceptable y que no comportaba un consumo excesivamente alto del microcontrolador. Con esta frecuencia y, suponiendo una situación en la que el motor fuera a un régimen de revoluciones alto (≈ 6000 rpm), el reloj del microcontrolador haría 40000 oscilaciones en cada revolución, lo que supondría 10000 ciclos de máquina. Esta velocidad puede parecer aceptable, sin embargo, cuando se simulaba en regímenes altos, se obtenían unos resultados caóticos.

El motivo era que, el sensor de revoluciones (recordemos que era un sensor inductivo que detectaba el movimiento de una rueda dentada), había sido programado mediante interrupciones y, el periodo de tiempo entre diente y diente del sensor era lo suficientemente pequeño como para impedir que se ejecutara en su totalidad la función que medía el ancho de pulso y que se calculaba del régimen de giro del motor. Esto desembocaba en un funcionamiento anómalo. Por ello se optó por subir la velocidad del clock y, como además había que añadir las comunicaciones, se decidió usar la velocidad máxima del microcontrolador, es decir, 48 MHz.

Para conseguir estas velocidades de reloj, se ha instalado un cristal de cuarzo de 48 MHz, identificable con la referencia ABL-48.000MHz-B1U, y cuya capacitancia de carga es de 18 pF. Por tanto, se deberá instalar con dos condensadores de 36 pF, pero como de este valor no se fabrica, se ha optado por instalar condensadores de 33 pF.

El microcontrolador se ha alimentado con una tensión de 5 V procedente de un regulador de tensión y se ha incorporado un pulsador que permite ejecutar un Reset.

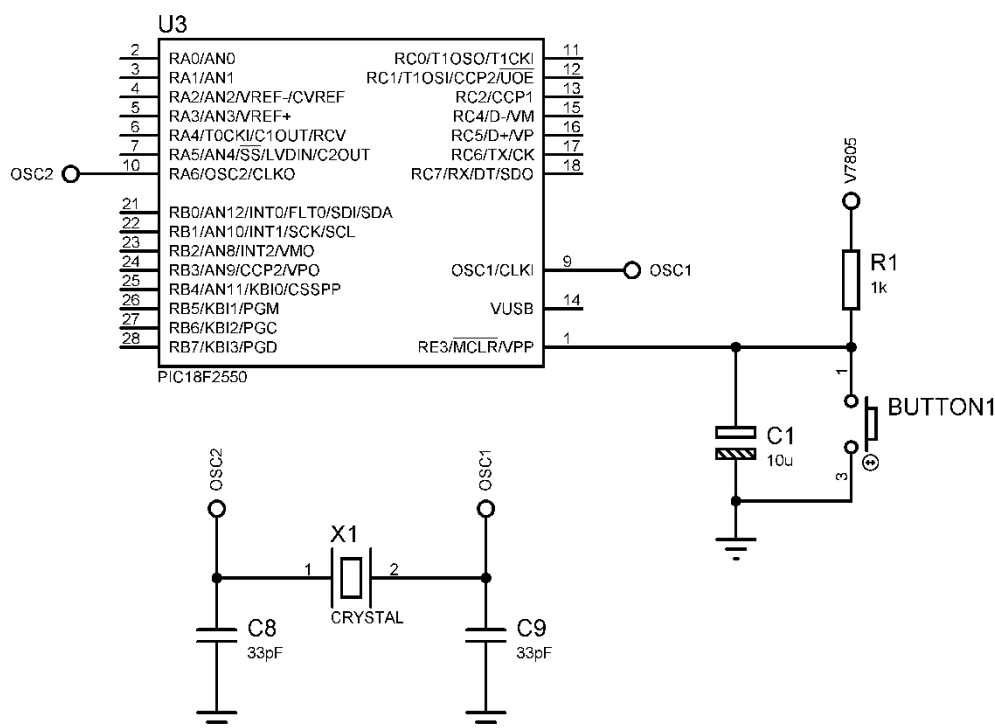


Figura 7.2.1. Esquema de las conexiones básicas del microcontrolador (fuente: propia).

7.3. Sensor de revoluciones

El sensor de revoluciones consta de dos sensores inductivos. Uno de ellos, se utiliza para conocer la posición del cigüeñal a partir de una rueda dentada que gira solidariamente a éste. El sensor produce una señal senoidal. Cada pulso corresponde a un diente de la rueda, y uno de los pulsos tiene un ancho mayor. En algunos motores, este diente se sitúa a 90 ° del PMS, sin embargo, en este proyecto se ha utilizado para señalar el PMS, yendo ubicado en los 0 °.

El segundo sensor inductivo va instalado en el árbol de levas y se utiliza para detectar el inicio del ciclo del motor, es decir, la carrera de admisión. Los generadores inductivos han sido conectados a los pines RB0 y RB1 respectivamente, correspondientes a las 2 primeras interrupciones externas (INT0 e INT1) del microcontrolador.

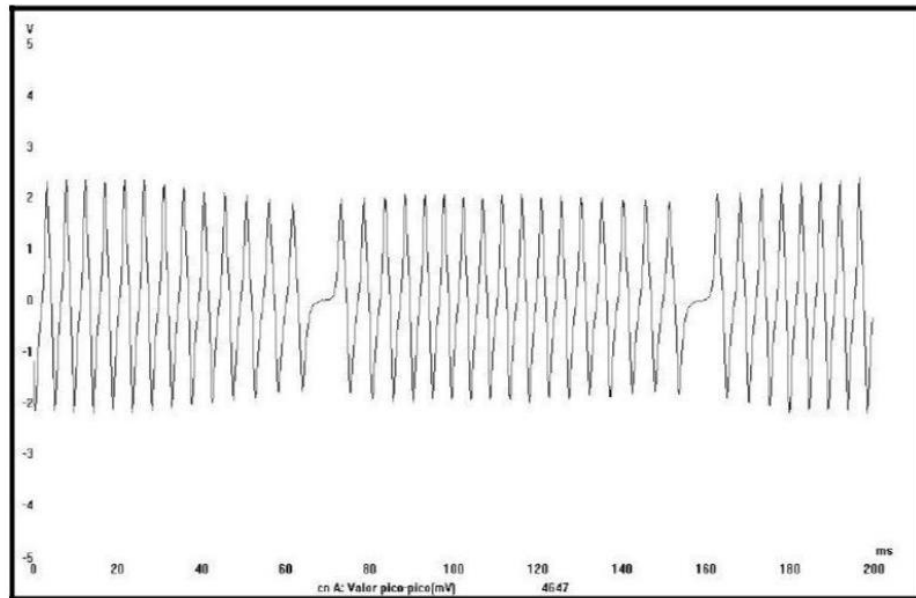


Figura 7.3.1. Señal producida por un sensor inductivo [23].

Para simular la primera señal en Proteus, ha sido necesario incorporar un amplificador operacional en modo comparador, que comparará las tensiones de dos generadores de pulsos diferentes. El generador encargado de simular los pulsos del mismo ancho tiene un duty-cycle del 50 %, y una frecuencia 35 veces superior al número de revoluciones por segundo. Con esto se consigue 35 pulsos por revolución. Por otro lado, en el generador encargado de simular el pulso más ancho, se ha fijado como frecuencia el número de revoluciones por segundo que se quiere simular, y un duty cycle del 10 %. Al sumar las dos tensiones, se obtiene una señal almenada, en la que cada 31 pulsos se obtienen uno más ancho que el resto, sumando un total de 32 pulsos.

El sensor situado en el árbol de levas consiste en un generador de pulsos en la que se ha fijado una frecuencia equivalente a la mitad del número de revoluciones por segundo que se quiere simular, y un duty cycle del 2 %.

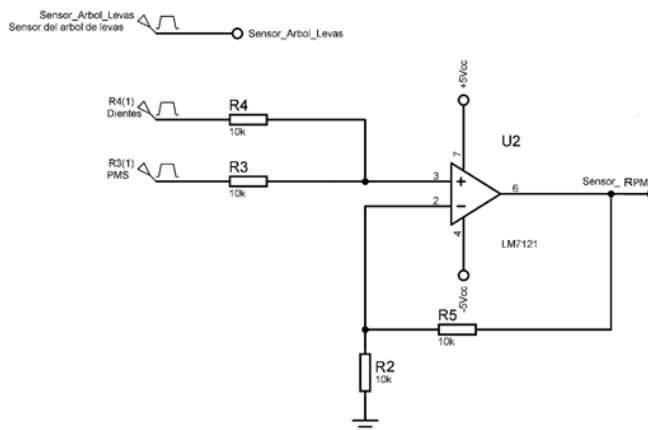


Figura 7.3.2. Esquema eléctrico de un amplificador operacional en modo sumador (fuente: propia).

No obstante, esta circuitería solo será necesaria para realizar las simulaciones, debido a la imposibilidad de disponer de un sensor real. Para hacer las pruebas en el laboratorio, se creará un circuito digital que genere estas señales. En la versión comercial, este operacional debe estar en modo comparador, para producir una señal digital a partir de una señal como la que se muestra en la Figura 7.3.1. Como las señales de la tensión producida por el sensor ubicado en el cigüeñal presenta una simetría impar respecto al origen de coordenadas, al incluir un amplificador operacional en modo comparador, y al situar la tensión de referencia a masa, se obtiene como salida, una señal equivalente a la de la entrada, pero convertida en un tren de pulsos.

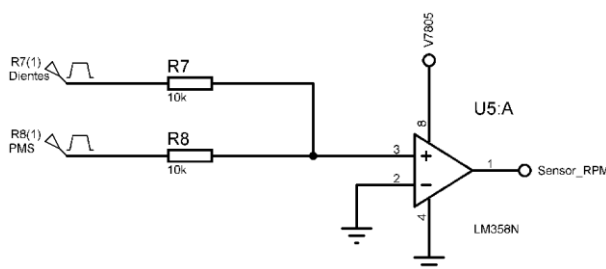


Figura 7.3.3. Esquema eléctrico de un amplificador operacional en modo comparador (fuente: propia).

7.4. Acelerador

En un automóvil, la posición del acelerador se determina a partir de un potenciómetro lineal de doble pista, alojado en el pedal del acelerador o en la mariposa de gases. Dicho potenciómetro presenta dos salidas (una por pista) inversamente proporcionales la una a la otra. Al acelerar, la tensión de una de las señales crece, mientras la otra decrece. Con esto se logra redundancia en el sistema, lo que se

traduce en una mayor seguridad. Sin embargo, con la finalidad de simplificar el diseño, en este proyecto se utilizará un potenciómetro lineal de 100 kΩ, de una sola pista, y de ajuste vertical. La ventaja de utilizar este tipo de potenciómetro es que no requiere de ninguna etapa acondicionadora para linealizar la señal de salida. Además, al utilizar un potenciómetro con un valor óhmico elevado, se reduce la corriente que circula por el sistema y, con ello, su consumo.

El modelo de potenciómetro utilizado permite un ángulo de giro de 300 °. Como EL ADC del microcontrolador es de 10 bits, la medición tendrá una sensibilidad de 0,29 °.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{300}{2^{10}} = 0,29^\circ \quad (\text{Ec. 7.4.2})$$

La salida del potenciómetro ha sido conectada a la entrada AN0 del microcontrolador. Debido a que el sensor va a trabajar en un rango de tensión comprendido entre 0 V y 5 V, no ha sido necesario utilizar las entradas V_{Ref+} y V_{Ref-} del integrado.

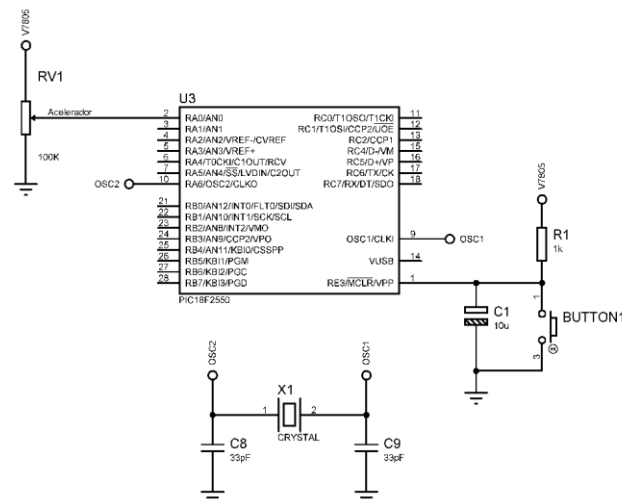


Figura 7.4.1. Esquema eléctrico del potenciómetro del acelerador (fuente: propia).

7.5. Sensor de temperatura

En automoción, se acostumbra a utilizar como sensor de temperatura, termistores NTC. Estos sensores deben ser instalados en un puente de Wheatstone, junto con un amplificador operacional de instrumentación, con la finalidad de linealizar la salida del sensor. Sin embargo, dado que se está trabajando en el diseño de un prototipo de pruebas para laboratorio, el termistor ha sido reemplazado por el mismo modelo de potenciómetro lineal que en el acelerador, con la finalidad de poder simular diferentes temperaturas de funcionamiento, y vislumbrar como ésta afecta al control del motor.

La salida del potenciómetro ha sido conectada a la entrada AN1 del microcontrolador. El sensor va a trabajar en un rango de tensión comprendido entre 0 V y 5 V, por lo que no ha sido necesario utilizar las entradas V_{Ref+} y V_{Ref-} del microcontrolador.

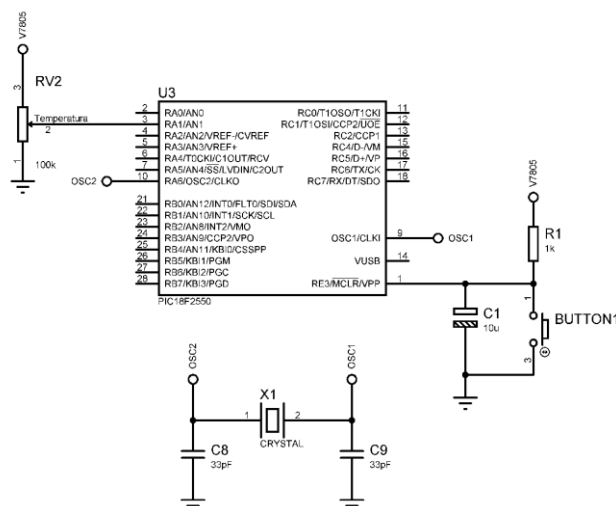


Figura 7.5.1. Esquema eléctrico del potenciómetro del sensor de temperatura (fuente: propia).

7.6. Indicador de temperatura

Se ha instalado un indicador de temperatura, consistente en un LED, capaz de mandar alertas al conductor en el caso de que la temperatura sea anormal. Se trata d un LED rojo, activado a través del pin RB3 del microcontrolador. El LED elegido se identifica con la referencia TLUR6400. Según los valores extraídos del datasheet, el diodo LED, en estado polarizado, deberá ser atravesado por 20 mA. Debido a que los puertos del microcontrolador pueden aportar 25 mA, no será necesario incorporar un transistor como driver. Por otro lado, la caída de tensión entre el ánodo y el cátodo, cuando el LED se encuentra en estado de conducción, será de 2 V.

Con estos datos, es posible calcular la resistencia limitadora a la que debe estar conectado el LED.

$$R = \frac{5-2}{20 \cdot 10^{-3}} = 150 \, \Omega \quad (\text{Ec. 7.6.3})$$

Por tanto, la resistencia elegida será de 150 Ω . A continuación, se muestra el esquema de conexionado.

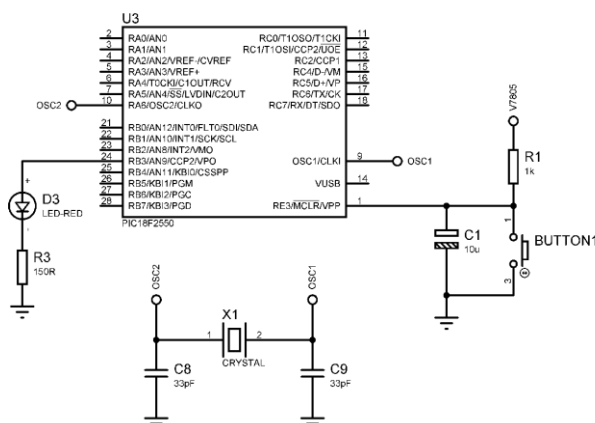


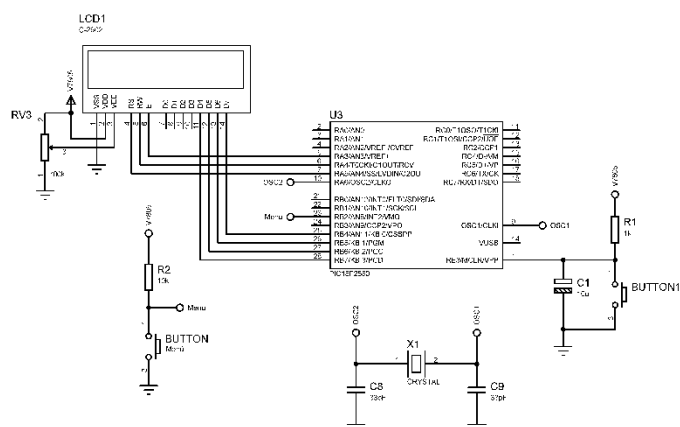
Figura 7.6.1. Esquema eléctrico del testigo de temperatura (fuente: propia).

7.7. Pantalla LCD

El proyecto incorporará una pantalla LCD en la que se mostrará la temperatura del motor, la posición del acelerador y el régimen de giro del motor. La pantalla utilizada se identifica por la referencia C2602. Esta pantalla posee 2 filas de 16 caracteres cada una.

La conexión entre una pantalla LCD y microcontrolador, se puede hacer de múltiples maneras. Una de las más comunes es mediante un bus de comunicación I2C. Sin embargo, esta opción requeriría de la conexión de un módulo I2C a la pantalla. Como el microcontrolador cuenta con suficientes pines sin conectar y, con la finalidad de ahorrar costes, se ha optado por realizar una conexión mediante un bus de 4 pines. De esta forma, los pines de a pantalla comprendidos entre D4 y D7, serán conectados entre los pines 7 y 4 del puerto B del microcontrolador. El pin RS (Selección del registro) ha sido conectado al pin RA5 del microcontrolador, el pin RW (Lectura/Escritura) al pin RA4 y el pin E (Enable) al RA3. También se ha conectado el pin V_{SS} a masa, el V_{DD} a 5 V y el V_{EE} a un potenciómetro lineal de 100 kΩ para regular el contraste.

En la pantalla se mostrará la posición del acelerador, el régimen de giro y la temperatura del motor. Para alternar entre estas 3 medidas, se ha incorporado un pulsador, junto con una resistencia pull-up de 10 kΩ, gracias a la cual la corriente quedará limitada a 500 μA cuando se oprima el pulsador.



7.8. Sistema de inyección

El sistema de inyección va a utilizar un transistor TIP120, con el que se obtiene unas ganancias de hasta 2500 y una corriente máxima en modo continuo, entre el emisor y el colector, de 5 A.

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	TIP120, TIP125	TIP121, TIP126	TIP122, TIP127	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	60	80	100	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CB}	60	80	100	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EB}	5.0			Vdc
Collector Current – Continuous – Peak	I_C	5.0 8.0			Adc
Base Current	I_B	120			mAdc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	65 0.52			W W/ $^\circ\text{C}$
Total Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	2.0 0.016			W W/ $^\circ\text{C}$
Unclamped Inductive Load Energy (Note 1)	E	50			mJ
Operating and Storage Junction, Temperature Range	T_J, T_{stg}	–65 to +150			$^\circ\text{C}$

Figura 7.8.1. Datasheet del transistor TIP120 [24].

El inyector utilizado presenta una resistencia interna de 21 Ω . Por otra parte, la tensión nominal de la batería se sitúa en 12 V. En la práctica, este valor no se alcanza nunca, ya que cuando el motor está en funcionamiento, la tensión proviene del alternador, y esta se sitúa en 14 V aproximadamente. Del mismo modo, si la tensión proviene de la batería, la tensión de ésta es superior a 12 V, salvo que se encuentre en un estado de carga deplorable. Por tanto, se ha considerado que el inyector va a estar

alimentado con una diferencia de potencial de al menos 12,6 V y que la caída de tensión entre el emisor y el colector del transistor es de aproximadamente 0,6 V, la corriente que consumirá será de 571 mA.

$$I = \frac{12,6 - 0,6}{21} = 571 \text{ mA} \quad (\text{Ec. 7.8.4})$$

Internamente, el inyector contiene una bobina encargada de generar el campo electromagnético necesario para abrir el paso de combustible. A la hora de medir la resistencia del inyector, esta bobina no se ha tenido en cuenta y, por ende, en la apertura del inyector aparecerá un transitorio que provocará que los 571 mA se alcancen de manera paulatina. A continuación, se adjunta una gráfica explicativa.



Figura 7.8.2. Gráfica de la corriente que atraviesa al inyector [25].

También se debe incorporar una resistencia limitadora de la corriente de base. Consultando el datasheet del componente [24], se observa que, cuando la corriente del colector es de 0,5 A, el valor de h_{FE} es de 1070 (Figura 7.8.3.) y la diferencia de potencial entre la base y el emisor del transistor, es de 1,4 V (Figura 7.8.4.). Por tanto, el valor de la resistencia será de 6746 Ω .

$$R = (5 - 1,4) \cdot \frac{1070}{0,571} = 6,746 \text{ k}\Omega \quad (\text{Ec. 7.8.2})$$

Normalizando el valor de la resistencia, obtenemos un valor de 6,8 k Ω , que será la que finalmente se instale en el circuito.

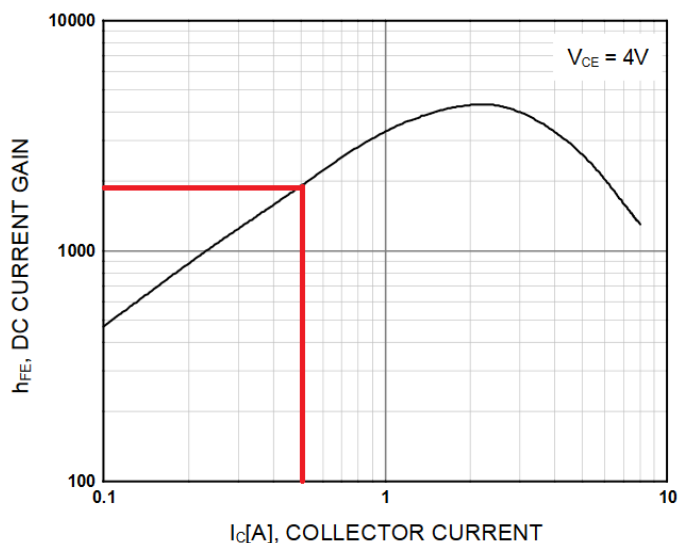


Figura 7.8.3. Ganancia del transistor TIP120, en función de la corriente del colector [24].

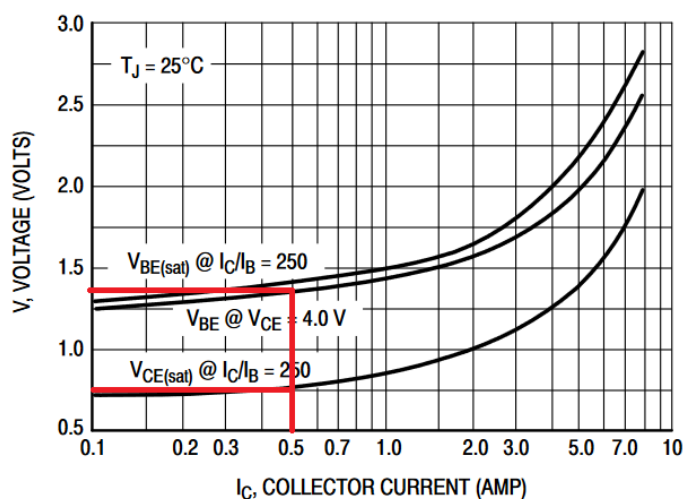


Figura 7.8.4. Tensiones de saturación del transistor TIP120, en función de la corriente del colector [24].

También se debe instalar un diodo en antiparalelo, con la finalidad de que absorba las corrientes autoinducidas provocadas por el transitorio del cierre del inyector. El modelo de diodo elegido es el BY255, y admite sobrepicos de corrientes de hasta 100 A, valor que se ha considerado suficiente para esta aplicación.

MAXIMUM RATINGS AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Rating at 25 °C ambient temperature unless otherwise specified.
Single phase, half wave, 60 Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

RATING	SYMBOL	BY251	BY252	BY253	BY254	BY255	UNIT
Maximum Repetitive Peak Reverse Voltage	V_{RRM}	200	400	600	800	1300	V
Maximum RMS Voltage	V_{RMS}	140	280	420	560	910	V
Maximum DC Blocking Voltage	V_{DC}	200	400	600	800	1300	V
Maximum Average Forward Current 0.375"(9.5mm) Lead Length $T_a = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_F	3.0					A
Peak Forward Surge Current 8.3ms Single half sine wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I_{FSM}	100					A
Maximum Forward Voltage at $I_F = 3.0\text{ Amps.}$	V_F	1.1					V
Maximum DC Reverse Current $T_a = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_R	20					μA
at rated DC Blocking Voltage $T_a = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$I_{R(H)}$	50					μA
Typical Junction Capacitance (Note1)	C_J	50					pF
Typical Thermal Resistance (Note2)	$R_{\theta JA}$	18					$^{\circ}\text{C/W}$
Junction Temperature Range	T_J	- 65 to + 175					$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{STG}	- 65 to + 175					$^{\circ}\text{C}$

Figura 7.8.5. Valores máximos asumibles por el diodo BY255 [26].

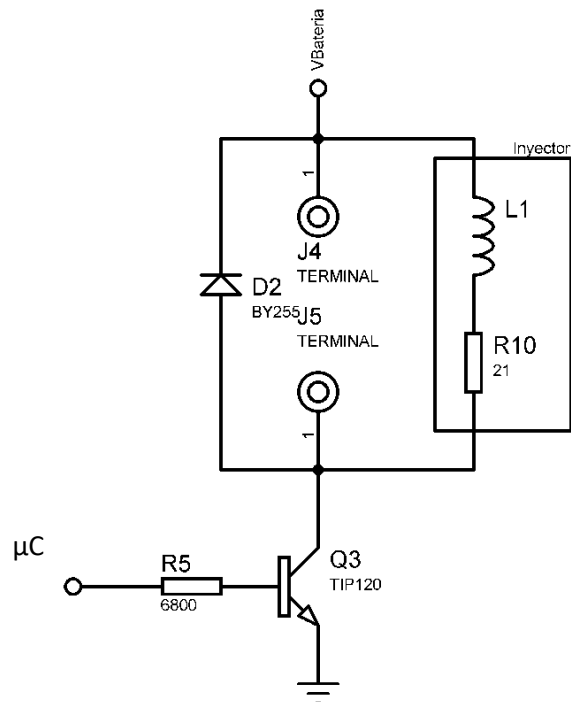


Figura 7.8.6. Esquema del circuito de inyección (fuente: propia).

7.8.1. Cálculo del disipador

Este transistor admite una temperatura máxima en la unión de 150 °C y la resistencia térmica entre la unión y el aire es de 62,5 °C/W. Teniendo en cuenta que la ECU está alojada en las proximidades del motor, y que este se encuentra a una temperatura de unos 90 °C se puede calcular si se precisa de un disipador.

$$P_{\text{disipación térmica}} = \frac{T_j - T_{\text{amb}}}{R_{\theta JA}} \quad (\text{Ec. 7.8.1.1})$$

$$P_{\text{disipación térmica}} = \frac{150 - 90}{62,5} = 62,5 \text{ °C/W} \quad (\text{Ec. 7.8.1.2})$$

Como el transistor maneja potencias de 343 mW, no se requiere el uso de un disipador.

$$P_{\text{transistor}} = V_{EC} \cdot I_{CE} + V_{BE} \cdot I_{BE} \quad (\text{Ec. 7.8.1.3})$$

$$P_{\text{transistor}} = 0,6 \cdot 571 \cdot 10^{-3} + 1,4 \cdot 534 \cdot 10^{-6} = 343 \text{ mW} \quad (\text{Ec. 7.8.1.4})$$

7.9. Sistema de encendido

El sistema de encendido está formado por un transistor IGBT, encargado de iniciar e interrumpir la alimentación del primario de la bobina de encendido. Para evitar inducir ruido y sobretensiones en la circuitería de control, se ha decidido utilizar un optoacoplador para aislar e independizar ambos circuitos. Sin embargo, la etapa de control del optoacoplador requiere de corrientes de hasta 60 mA según los valores consultados por el datasheet, mientras el microcontrolador apenas puede suministrar 25 mA.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
INPUT				
Reverse voltage		V_R	5	V
Forward current		I_F	60	mA
Surge current	$t \leq 10 \mu s$	I_{FSM}	3	A
Power dissipation		P_{diss}	100	mW
OUTPUT				
Collector emitter breakdown voltage		V_{CEO}	70	V
Emitter base breakdown voltage		V_{EBO}	7	V
Collector current		I_C	50	mA
	$t \leq 1 \text{ ms}$	I_C	100	mA
Power dissipation		P_{diss}	150	mW

Figura 7.9.1. Valores máximos asumibles por el optoacoplador [27].

Para solucionar este problema, se precisa de la instalación de un segundo transistor, con el que controlar el encendido del optoacoplador. El modelo elegido es el BD139.

Se quiere limitar la corriente de la base a 20 mA. Por ende, se deberá incorporar una resistencia a la salida del microcontrolador de un valor de, al menos 215 Ω . Se ha optado por utilizar una de 220 Ω .

$$R_b = \frac{5-0,7}{20 \cdot 10^{-3}} = 215 \Omega \quad (\text{Ec. 7.9.1})$$

El circuito de control del optoacoplador irá conectado al colector del transistor. No obstante, como el transistor utilizado tiene un valor h_{FE} alto para la aplicación requerida y como no se quiere quemar el LED del optoacoplador, es necesario instalar una segunda resistencia. A través de los datasheets del optoacoplador y del transistor, se sabe que la caída de tensión en el circuito de control del primero es de 1,3 V mientras que la diferencia de potencial entre el emisor y el colector del transistor es de 70 mV. Por lo tanto, se deberá instalar una resistencia de 72,6 Ω . Como se debe normalizar este valor, se ha optado por instalar una resistencia de 68 Ω , quedando la corriente limitada a 53,4 mA.

$$R_6 = \frac{5-70 \cdot 10^{-3}-1,3}{50 \cdot 10^{-3}} = 72,6 \Omega \quad (\text{Ec. 7.9.2})$$

Cuando el LED del optoacoplador es atravesado por una corriente de 50 mA, el valor de la corriente que circula entre el colector y el emisor del fototransistor es de 2 mA. Para reducir la cantidad de potencia disipada por este elemento, se ha incluido una resistencia de un valor 5,6 k Ω .

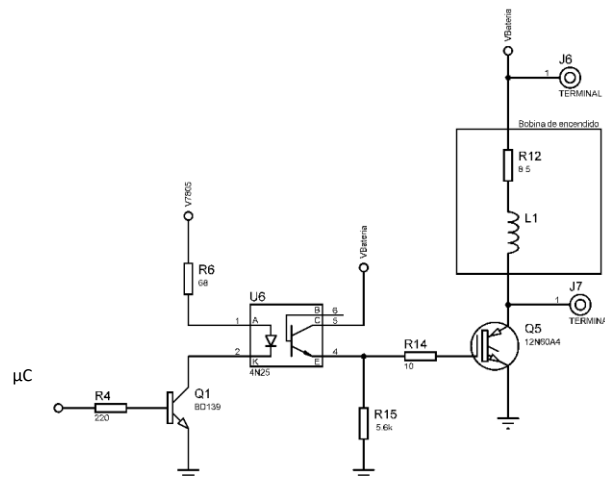


Figura 7.9.2. Circuito de encendido (fuente: propia).

7.9.1. Cálculo de los disipadores

Según los valores extraídos del datasheet del transistor BD139, el transistor que controla el encendido del LED del optoacoplador puede disipar hasta 1,25 W, cuando la temperatura ambiental es de 23 $^{\circ}\text{C}$. Teniendo en cuenta que la temperatura de la unión puede llegar a ser de 150 $^{\circ}\text{C}$, la resistencia térmica entre la unión y el ambiente de este dispositivo es de 100 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

$$R_{J-A} = \frac{150-25}{1,25} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad (\text{Ec. 7.9.1.1})$$

Con estos datos, se puede calcular la potencia que es capaz de disipar el dispositivo con una temperatura ambiental de 90 °C. El resultado es de 0,6 W.

$$P_C (T=90 \text{ }^{\circ}\text{C}) = \frac{150-90}{100} = 0,6 \text{ W} \quad (\text{Ec. 7.9.1.2})$$

Teniendo en cuenta que el transistor va a ser atravesado por 50 mA a través de su colector, y por 20 mA a través de su base, la caída de tensión máxima entre el emisor y el colector del transistor es de 11,675 V. Como este valor no se va a alcanzar, no se precisa de la instalación de un disipador.

$$V_{CE} = \frac{0,6-25 \cdot 10^{-3} \cdot 0,65}{50 \cdot 10^{-3}} = 11,675 \text{ V} \quad (\text{Ec. 7.9.1.3})$$

El transistor IGBT seleccionado, dispone de una temperatura máxima de la unión de hasta 150 °C y una resistencia térmica entre la unión y la cápsula de 0,75 °C/W. Este modelo de transistor se fabrica con la cápsula TO-220, la cuál tiene una resistencia térmica entre ella misma y el disipador, sin añadir mica, de 0,8 °C/W.

Se ha escogido un disipador con una resistencia térmica de 10,2 °C/W. Así mismo, se considera que la ECU, al ir alojada dentro del vano del motor, puede estar sometida a temperaturas de hasta 90 °C. Con estos datos, se puede calcular la potencia máxima que disipara el dispositivo, sin instalar un disipador térmico.

$$P_T = \frac{150-90}{0,75+0,8+10,2} = 5,1 \text{ W} \quad (\text{Ec. 7.9.1.4})$$

El transistor IGBT no disipa potencia durante su fase de bloqueo, ya que no lo atraviesa corriente. Sin embargo, durante su fase de conducción se disipará potencia, en forma de calor, debido a la existencia de una caída de tensión entre el colector y el emisor, cuando éste es atravesado por una corriente. Con la temperatura de la unión máxima que admite el dispositivo, se estima una caída de tensión aproximada de 0,9 V, con lo que el dispositivo podría llegar a ser atravesado por más de 5,67 A, sin sufrir ningún daño (provocado por una refrigeración deficiente), en el caso de que el transistor estuviera siempre conduciendo. Como el encendido trabaja con un duty-cycle de entorno al 75 % (ya que durante la carrera de escape está inactivo), podría trabajar con corrientes de hasta 7,57 A (despreciando el efecto de las sobretensiones).

$$I_{max} = \frac{5,11}{0,9} = 5,67 \text{ A} \quad (\text{Ec. 7.9.1.5})$$

$$I_{max} = \frac{5,11}{0,75 \cdot 0,9} = 7,57 \text{ A} \quad (\text{Ec. 7.9.1.6})$$

7.10. Diseño de la placa de circuito impreso

La placa de circuito impreso tiene unas dimensiones de 260 mm x 140 mm. Estas dimensiones permiten establecer una separación significativa entre los circuitos de inyección y encendido, y el microcontrolador. De esta forma, se consigue reducir el impacto de las sobretensiones generadas en ambos circuitos, sobre el circuito de control.

Por otro lado, el tamaño de las pistas elegido es de 100 milésimas de pulgada para el circuito de potencia del encendido, 50 milésimas de pulgada para el circuito de potencia de la inyección, 20 milésimas de pulgada para la circuitería de control y 10 milésimas de pulgada para las comunicaciones.

8. Diseño de los mapas

En este apartado se expondrán los procedimientos que se han llevado a cabo para diseñar los mapas del motor. Se debe tener presente que los mapas que aquí se diseñan, son una mera aproximación y que, por tanto, el modelo comercial deberá ser puesto a punto en un banco de pruebas de motores. Los fabricantes dedican ingentes cantidades de recursos económicos y humanos, a llevar a cabo esta acción. Una vez diseñados los mapas, se prueban en bancos de potencia para motores, sometiendo a a diferentes condiciones de marcha, y se comprueban todas las variables del motor (potencia generada, emisiones, consumo de combustible, temperatura de funcionamiento, etc.). En función de los datos obtenidos, se modifica el mapa previamente confeccionado, con la finalidad de mejorar los resultados de dichas pruebas. Sin embargo, esto no se podrá llevarse a cabo debido a la falta de medios disponibles.

8.1. Mapa de inyección

Para diseñar los mapas se ha considerado que la unidad de control electrónico iba a ser instalada en motores de gasolina atmosféricos con una cilindrada de 250 cm³. Se ha considerado que, durante la carrera de admisión, el cilindro se llenaría completamente de aire. En la práctica, esto no es cierto puesto que la eficiencia del llenado de los cilindros depende de diversos factores, entre los que destacan el régimen de revoluciones del motor, la presión atmosférica, o la temperatura ambiental. Sin embargo, cabe tener presente que la ECU diseñada en este proyecto, es un prototipo experimental y que, los modelos comerciales deberán probarse en bancos de pruebas de motores para así calibrar sus mapas correctamente.

Se ha establecido que el dosado estaría situado entre 0,9, en el caso de que se requiera de una mezcla rica, y 1,3, en el caso de que se precise de una mezcla pobre. En base a estos parámetros, se puede calcular la gasolina que se debería inyectar cuando se requiere mezcla rica y cuando se requiere mezcla pobre.

$$m_{combustible} = \frac{v_{aire} \cdot \rho_{aire}}{AFR_E \cdot dosado \cdot 2} \quad (\text{Ec. 8.1.1})$$

$$m_{combustible(rica)} = \frac{250 \cdot 0,001}{14,7 \cdot 0,9 \cdot 2} = 9,45 \text{ mg} \quad (\text{Ec. 8.1.2})$$

Con estos datos, se sabe que se necesitarán 9,45 mg de gasolina, por cada dos vueltas del cigüeñal, en el caso de que se requiera de una mezcla rica. Del mismo modo, también se ha calculado la masa de gasolina necesaria para obtener una mezcla pobre con un dosado de 1,3.

$$m_{combustible(pobre)} = \frac{250 \cdot 0,001}{14,7 \cdot 1,3 \cdot 2} = 6,54 \text{ mg} \quad (\text{Ec. 8.1.3})$$

Por tanto, el inyector deberá ser capaz de suministrar entre 6,54 mg y 9,45 mg de gasolina por cada dos revoluciones. Nuevamente cabe destacar que estos datos son una mera aproximación, y que la densidad del aire o el llenado del cilindro depende de diversos factores, como la presión atmosférica, la temperatura ambiental o la temperatura del motor, que no han sido tenidos en cuenta y que, por tanto, deberían calibrarse en un banco de pruebas, además de añadirse más sensores.

Se dispone de un inyector, identificable con la referencia 280 150 715. Dicho inyector, es capaz de suministrar un caudal de gasolina de 137 g/min a 3 bares de presión. Sin embargo, la gasolina solo puede ser inyectada durante las carreras de admisión y compresión, por motivos obvios; por lo tanto, a efectos prácticos este inyector podrá suministrar, como máximo, 68,5 g/min de gasolina. Considerando que el motor alcanza su régimen de revoluciones máximo a 6000 rev/min, el caudal máximo de gasolina necesario es de 28,35 g/min, por lo que este inyector es capaz de abastecer sobradamente al motor.

$$caudal_{gasolina \text{ (máximo)}} = 9,45 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{6000}{2} = 28,35 \text{ g/min} \quad (\text{Ec. 8.1.4})$$

Teniendo en cuenta que el inyector es capaz de aportar un caudal 137 g/min, cuando éste está abierto de manera continua, se puede calcular el duty-cycle en función de la demanda de gasolina del motor. Partiendo de que se requiere de una mezcla pobre cuando el motor está a ralentí, a 90 °C y el acelerador sin accionar, y una mezcla rica en el caso opuesto, se han calculado el duty-cycle para cada instante de marcha.

	Acelerador [%]									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
600	3%	3%	3%	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%
700	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%
800	4%	4%	4%	4%	5%	5%	5%	5%	5%	6%
900	4%	5%	5%	5%	5%	5%	6%	6%	6%	6%
1000	5%	5%	5%	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%
1250	6%	6%	7%	7%	7%	8%	8%	8%	8%	9%
1500	7%	8%	8%	8%	9%	9%	9%	10%	10%	10%
1750	9%	9%	9%	10%	10%	11%	11%	11%	12%	12%
2000	10%	10%	11%	11%	12%	12%	13%	13%	13%	14%
2250	11%	12%	12%	13%	13%	14%	14%	15%	15%	16%
2500	12%	13%	14%	14%	15%	15%	16%	16%	17%	17%
2750	14%	14%	15%	15%	16%	17%	17%	18%	18%	19%
3000	15%	16%	16%	17%	18%	18%	19%	19%	20%	21%
3250	16%	17%	18%	18%	19%	20%	20%	21%	22%	22%
3500	17%	18%	19%	20%	20%	21%	22%	23%	23%	24%
3750	19%	19%	20%	21%	22%	23%	23%	24%	25%	26%
4000	20%	21%	22%	22%	23%	24%	25%	26%	27%	28%
4250	21%	22%	23%	24%	25%	26%	27%	28%	28%	29%
4500	22%	23%	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%	31%
4750	24%	25%	26%	27%	28%	29%	30%	31%	32%	33%
5000	25%	26%	27%	28%	29%	30%	31%	32%	33%	34%
5250	26%	27%	28%	30%	31%	32%	33%	34%	35%	36%
5500	27%	29%	30%	31%	32%	33%	34%	36%	37%	38%
5750	29%	30%	31%	32%	34%	35%	36%	37%	38%	40%
6000	30%	31%	32%	34%	35%	36%	38%	39%	40%	41%

Tabla 8.1.1. Mapa de inyección. Duty-cycle.

Los valores presentados corresponden a un modo de funcionamiento en el que el motor ha alcanzado su temperatura de trabajo (90 °C). En caso contrario, se enriquecerán los valores mostrados un 3 %. Esta tabla puede ser graficada para obtener una representación tridimensional del mapa de inyección.

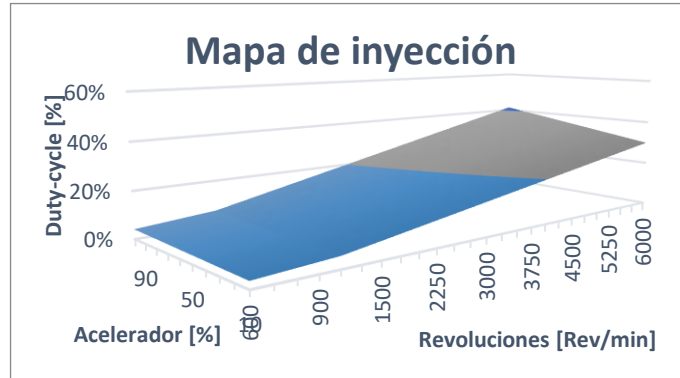


Figura 8.1.1. Mapa de inyección (fuente: propia).

8.2. Mapa de encendido

El mapa de encendido es utilizado para regular los grados de avance. Se ha establecido un ángulo de avance comprendido entre 3 ° y 25 °. Sin embargo, el control del avance se hará a través de los dientes del sensor del cigüeñal, a diferencia del duty-cycle del inyector que se ha programado midiendo el tiempo que debe estar el inyector abierto. Por ende, se ha hecho una conversión, para transformar los grados de avance de encendido, en dientes de avance de encendido. En base a esto, se ha diseñado la siguiente tabla.

	Acelerador [%]									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
600	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
700	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
800	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
900	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1000	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1250	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1750	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2250	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2750	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
3000	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
3250	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2
3500	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
3750	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4000	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4250	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4500	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4750	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5000	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5250	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5500	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
5750	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
6000	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabla 8.2.1. Mapa de encendido. Dientes de avance.

A continuación, se muestra una representación gráfica del mapa de encendido.

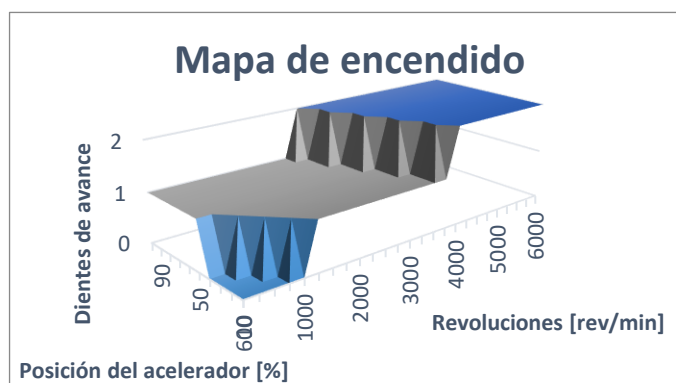


Figura 8.2.1. Mapa de avance de encendido (fuente: propia).

9. Diseño del Software

En este apartado se explica mediante diagramas de flujo, el software desarrollado para controlar el microcontrolador. Estos diagramas han permitido realizar las labores de programación de manera más sencilla, y ayudan a la comprensión de las diferentes funciones que debe ser capaz de cubrir el algoritmo. Dicho código viene incluido en los anexos de este proyecto.

9.1. Rutina principal

El proyecto solo requiere de dos librerías. La primera de ellas es la del microcontrolador, conocida como 18H2550.h. La otra librería utilizada, proporciona una serie de funciones para simplificar el control de la pantalla LCD. Aunque el compilador CCS C incluya una librería perfectamente válida para llevar a cabo esta función, se ha preferido utilizar otra, denominada FLEX_LCD.c que, además de incorporar las mismas funciones que la librería de serie, permite conectar la pantalla a los pines que se deseen. La librería de serie, requeriría de la utilización del puerto B o C del microcontrolador, quedando ocupadas las interrupciones 0, 1 y 2 ubicadas en el puerto B o las conexiones RX o TX que se encuentran en el puerto C y, de esta manera, se han podido definir los pines de conexión de manera totalmente libre.

En la rutina principal, también se ha programado la configuración del microcontrolador. Como algunas de las interrupciones utilizadas son más críticas, y requieren de una respuesta instantánea, ha sido necesario habilitar la posibilidad de asignar prioridad a las interrupciones. Además, debido a la necesidad de disponer de una elevada velocidad de procesamiento, se ha configurado el reloj a su velocidad máxima, es decir, a 48 MHz. Otro aspecto importante en la configuración del microcontrolador ha sido los fuses, el registro TRIS de los puertos, el número de bits del ADC, que se ha fijado en 10, y la comunicación RS232, la cual se hará a una velocidad de 9600 baudios y con bytes de 8 bits sin bit de paridad. Finalmente se han declarado las variables globales y los mapas del motor.

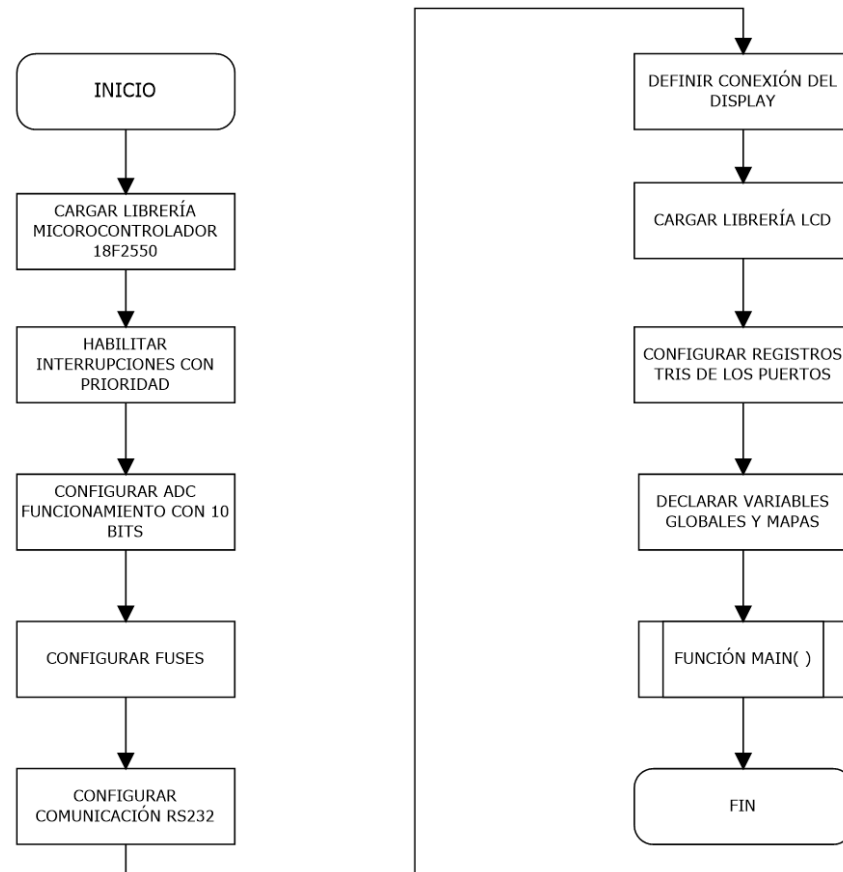


Figura 9.1.1. Diagrama de flujo de la rutina principal (fuente: propia).

9.2. Rutina main()

La función main() es la función principal de todo programa escrito en C. En este proyecto, la función main() contiene, entre otras cosas, la configuración de los Timers, las interrupciones externas, el ADC o el bucle principal.

Lo primera instrucción en ejecutarse, dentro de la función main(), ha sido la que permite inicializar el display. Seguidamente, se han configurado y habilitado todos los Timers del microcontrolador, para que trabajen con el reloj interno. Estos Timers son:

- Timer 0: Se ha utilizado para medir el periodo de tiempo durante el cual, el árbol de levas da una vuelta. Considerando que el motor está girando en ralenti a 600 rpm, el árbol de levas giraría a 300 rpm, lo que le supondría un periodo de revolución de 200 ms. Con estos datos se puede calcular el prescaler que se necesita.

$$200 \cdot 10^{-3} = \frac{4}{48 \cdot 10^6} \cdot 2^{16} \cdot \text{Prescaler} \quad (\text{Ec. 9.2.1})$$

Resolviendo esta ecuación, se obtiene que, como mínimo, se necesita un preescaler de 36,62. Sin embargo, solo es posible configurar el preescaler con potencias de 2. Por tanto, será necesario configurar el Timer 0 con un preescaler de 64.

- Timer 1: Es utilizado para medir el ancho de pulso provocado por los dientes del sensor ubicado en el cigüeñal. El cigüeñal girará a una velocidad mínima de 600 rpm. Con esta velocidad de giro y, teniendo en cuenta que al existir un diente de mayor anchura a los demás equivale a que el sensor tuviera 35 dientes del mismo tamaño y que el tamaño de la cresta es igual a la de los valles, se puede establecer que la anchura mínima del pulso será inferior a 1,5 ms.

$$\text{Ancho de pulso} = \frac{1}{600 \text{ rev/min}} \cdot 60 \text{ s} \cdot \frac{1}{35 \text{ dientes/vuelta}} \cdot \frac{1}{2} = 14 \text{ ms} \quad (\text{Ec. 9.2.2})$$

Con estos datos, se ha calculado que el preescaler necesario es de 0,26, por lo que se seleccionará uno de 1.

$$1,43 \cdot 10^{-3} = \frac{4}{48 \cdot 10^6} \cdot 2^{16} \cdot \text{Prescaler} \quad (\text{Ec. 9.2.3})$$

- Timer 2: Permite esperar el tiempo necesario para que se cargue el condensador del ADC de aproximaciones sucesivas, antes de realizar la lectura del mismo. Como no se requiere de una frecuencia de muestreo alta, especialmente en el caso del sensor de temperatura, se ha configurado el ADC con un preescaler y un postescaler de 16, permitiendo hacer una lectura cada 5,5 ms. Este valor se considera suficiente porque permite una frecuencia de muestreo lo suficientemente alta para que exista una velocidad de respuesta alta, pero, a su vez, es lo suficientemente baja como para no comprometer la fluidez de ejecución del algoritmo.

$$t_{\text{muestreo}} = \frac{4}{48 \cdot 10^6} \cdot 2^8 \cdot 16 \cdot 16 = 5,46 \text{ ms} \quad (\text{Ec. 9.2.4})$$

- Timer 3: Se encarga de controlar el tiempo de apertura del inyector. A ralentí, el periodo de la señal que controla el inyector, es la misma que el periodo de giro del árbol de levas, es decir, 200 ms. A esta velocidad, el inyector puede estar abierto un 7 % del ciclo, si el motor estuviera frío y el acelerador oprimido. Por tanto, con estos parámetros, que son los más desfavorables, el tiempo máximo que puede estar abierto el inyector son 14 ms.

$$t_{\text{max apertura}} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{7}{100} = 14 \text{ ms} \quad (\text{Ec. 9.2.5})$$

Con este valor, es posible calcular el prescaler necesario. En este caso será de 2,56, con lo que se ha configurado con un prescaler de 4.

$$14 \cdot 10^{-3} = \frac{4}{48 \cdot 10^6} \cdot 2^{16} \cdot \text{Prescaler} \quad (\text{Ec. 9.2.6})$$

Posteriormente se han habilitado as interrupciones externas AN0, AN1 y AN2, para que trabajen por flanco de subida; los puertos analógicos AN0 y AN1 para que utilicen el reloj interno y se han inicializado los Timers con un valor en el registro de 0. Lo último que se ejecutará en esta rutina es un bucle infinito que contiene las funciones que permiten imprimir valores en el display, conocer el incremento de duty-cycle provocado por una temperatura del motor baja, el valor de duty-cycle y el avance total e imprimir datos a través del puerto RS232.

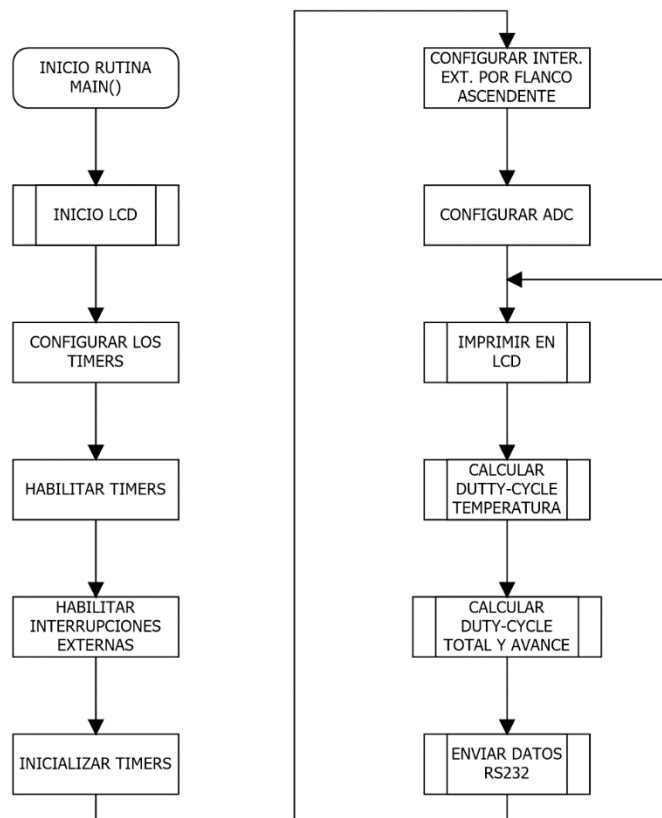


Figura 9.1.2. Diagrama de flujo de la rutina main (fuente: propia).

9.3. Rutina Timer 2

El Timer 2 es utilizado para controlar la lectura del ADC. Internamente funciona gracias a una máquina de estados. Cada vez que se ejecuta la interrupción por temporización, se alterna entre dos posibles estados.

En el primer estado, se lee el valor del registro del ADC de la temperatura y se hace la conversión, para obtener finalmente una temperatura comprendida entre los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Finalmente se prepara en ADC para que haga la lectura del puerto analógico del acelerador, pero esta lectura se llevará a cabo en el siguiente estado.

El segundo estado permite leer el valor del registro del ADC del canal analógico del acelerador. Posteriormente se hace la conversión, para obtener así un valor comprendido entre el 0 % y el 100 %. Finalmente se prepara el ADC para que haga la lectura de la temperatura, cuando se vuelva a ejecutar la interrupción del Timer 2.

En esta rutina también se ha configurado el testigo luminoso por temperatura anormalmente alta. Si en algún momento se detectase que la temperatura del motor superase los $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, se encenderá un LED para alertar al conductor. Finalmente, esta rutina concluirá reiniciando el registro del Timer 2.

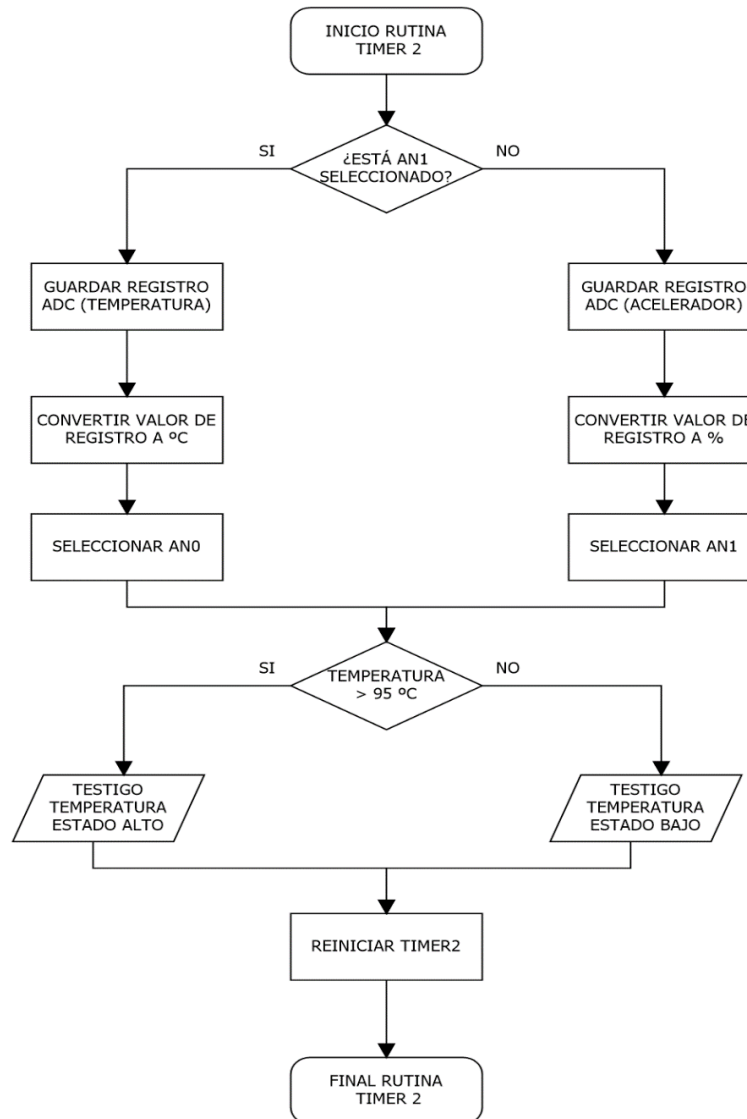


Figura 9.1.3. Diagrama de flujo de la rutina del Timer 2 (fuente: propia).

9.4. Rutina Timer 3

La rutina del Timer 3 tiene como misión controlar el tiempo de apertura del inyector. Cuando se detecta que el motor ha iniciado la carrera de admisión, unos instantes después, se abre el inyector y se carga el registro del Time 3 un valor equivalente al tiempo que tiene que estar el inyector abierto. De esta forma, cuando el registro de este temporizador se desborda, el inyector es cerrado y el registro reiniciado.

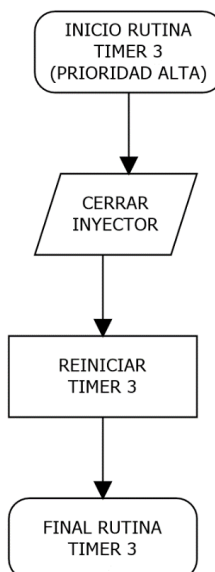


Figura 9.1.4. Diagrama de flujo de la rutina del Timer 3 (fuente: propia).

9.5. Rutina interrupción externa 0

La interrupción externa 0 (INT EXT 0) tiene por objetivo detectar los dientes del sensor ubicado en el cigüeñal. Cada vez que se detecta un pulso (o diente), se reinicia el Timer 1 y se configura esta interrupción externa para que funcione por flanco de bajada. De esta forma, cuando se termina el pulso, se puede leer el registro del Timer 1 para poder determinar cuál ha sido la duración de dicho pulso. Posteriormente, se debe configurar nuevamente la interrupción externa para que trabaje por flanco de subida y detecte el próximo pulso.

Llegados a este punto, se comprueba si el pulso ha sido significativamente más grande que el anterior. De ser así, se podría determinar que el pistón se encuentra en el PMS. De lo contrario, existe una variable que contabiliza los pulsos, para conocer en qué posición se encuentra el cigüeñal.

Tomando como referencia la posición del cigüeñal y con la ayuda de un testigo que permita discernir las carreras de admisión y compresión de las carreras de expansión y escape, se puede controlar el instante de apertura del inyector o la apertura y cierre del primario de la bobina de encendido. Cada vez que se completa una vuelta, se deben de reiniciar todos los contadores.

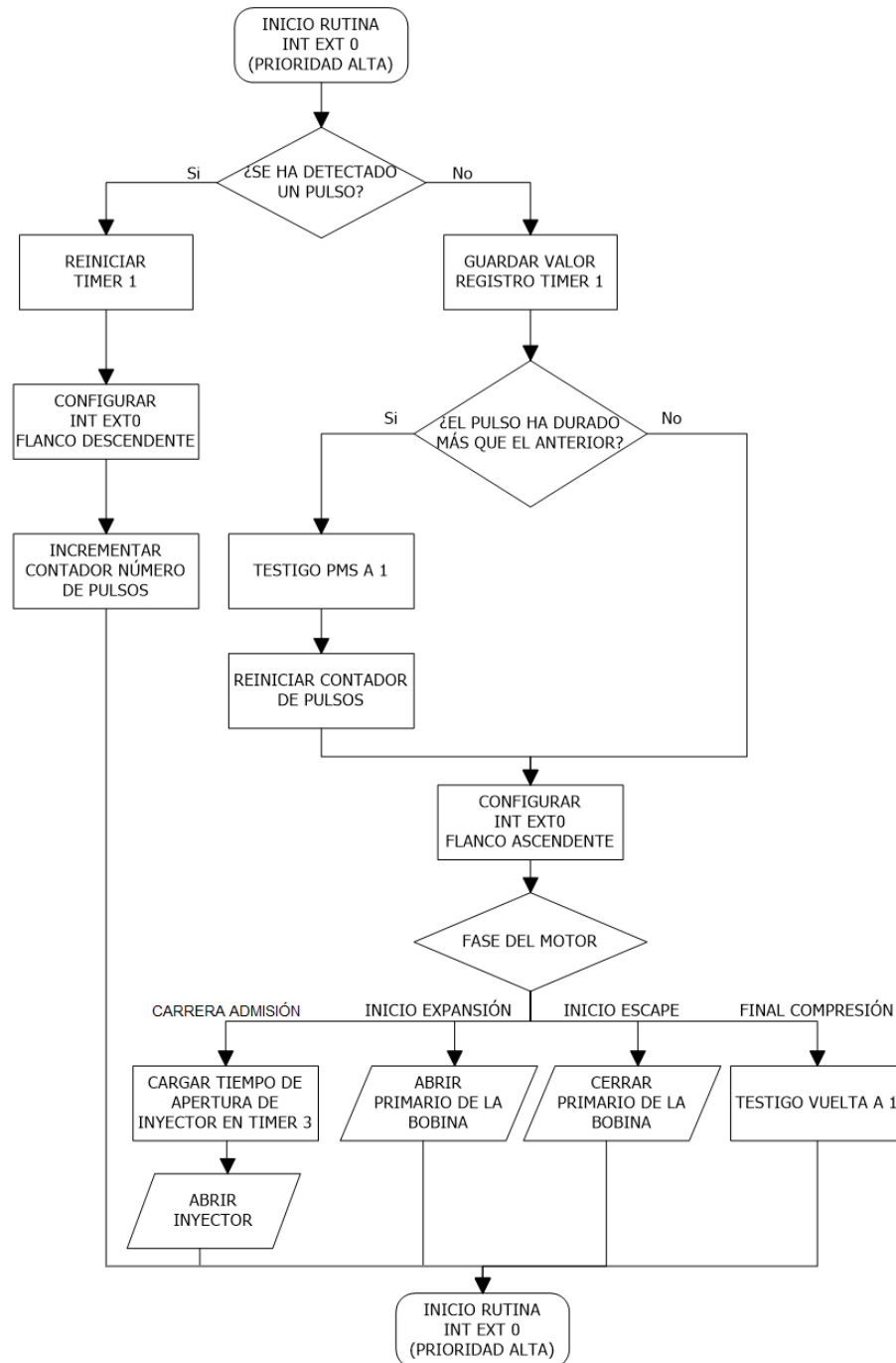


Figura 9.5.1. Diagrama de flujo de la rutina de la interrupción externa 0 (fuente: propia).

9.6. Rutina interrupción externa 1

La interrupción externa 1 permite conocer si el motor se encuentra en la primera vuelta de su ciclo (admisión y compresión) o en la segunda vuelta (expansión y escape). Para ello, se sirve de una señal

proveniente del sensor ubicado en el árbol de levas. Cada vez que se detecta un pulso, se activa un testigo que es utilizado en otras rutinas del programa explicadas anteriormente.



Figura 9.6.1. Diagrama de flujo de la rutina de la interrupción externa 1 (fuente: propia).

9.7. Interrupción externa 2

Con la interrupción externa 2 se puede controlar los datos que se visualizan en el display. Para ello, se dispone de una variable que inicialmente almacena un valor de 0 y que se autoincrementa cada vez que se acciona el pulsador. No obstante, cuando la variable ha alcanzado su valor máximo, se reinicia a 1. De esta forma, hay una pantalla, que corresponde a la inicial, la cual solo se visualizará una vez.

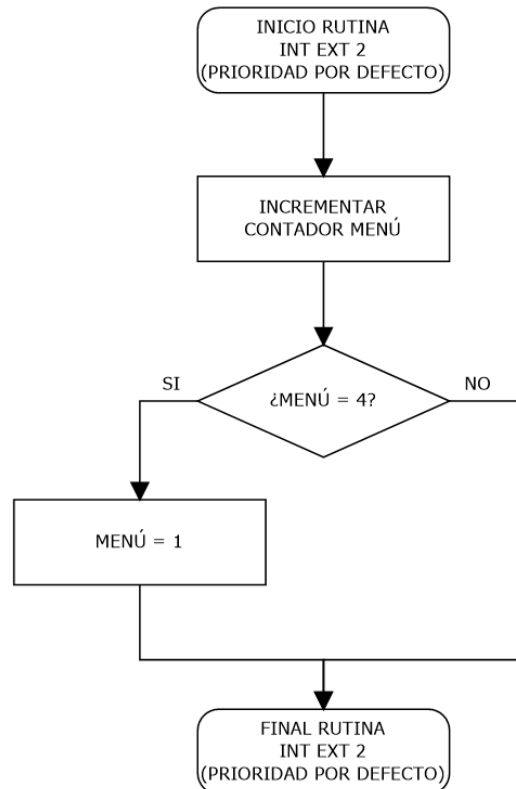


Figura 9.7.1. Diagrama de flujo de la rutina de la interrupción externa 2 (fuente: propia).

9.8. Rutina de cálculo del incremento de duty-cycle debido a la temperatura

Esta rutina aprovecha la variable global que almacena el valor de la temperatura del motor, para determinar si es necesario aumentar el porcentaje de tiempo que tiene que estar el inyector abierto por cada ciclo del motor. De esta forma, si la temperatura del motor es baja, se enriquecerá la mezcla de aire y combustible. A este control se le ha añadido una histéresis de 5 °C.

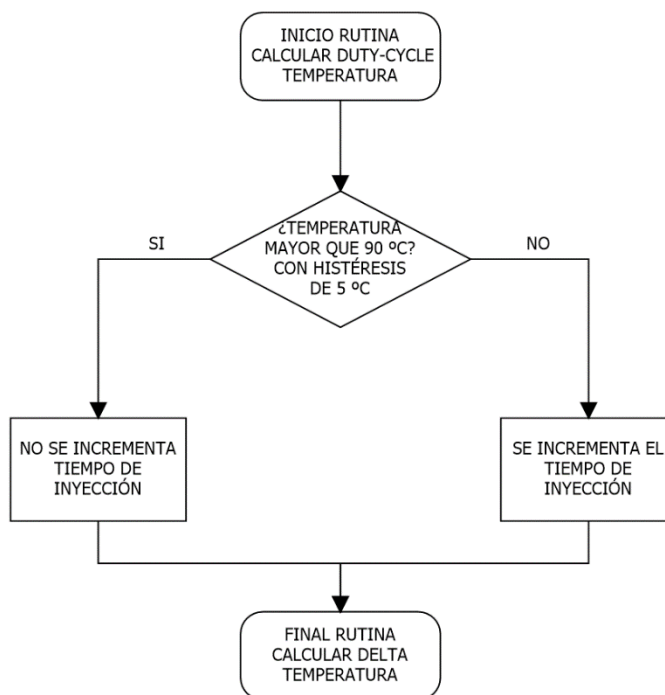


Figura 9.8.1. Diagrama de flujo de la rutina de cálculo del duty-cycle debido a temperatura (fuente: propia).

9.9. Rutina encargada de imprimir valores en el display

La rutina a la que se hace referencia permite imprimir las variables más significativas en el display junto con sus unidades. Existe una pantalla inicial en donde se imprime el nombre del proyectista y que solo se puede visualizar una vez. En el momento que se acciona el pulsador, la pantalla alterna para mostrar el régimen de giro del motor.

Las siguientes pantallas corresponden a la visualización del valor de la temperatura del motor, en °C, y la posición del acelerador en %. Si se oprimiera el pulsador nuevamente, se volvería a la pantalla de las revoluciones por minuto.

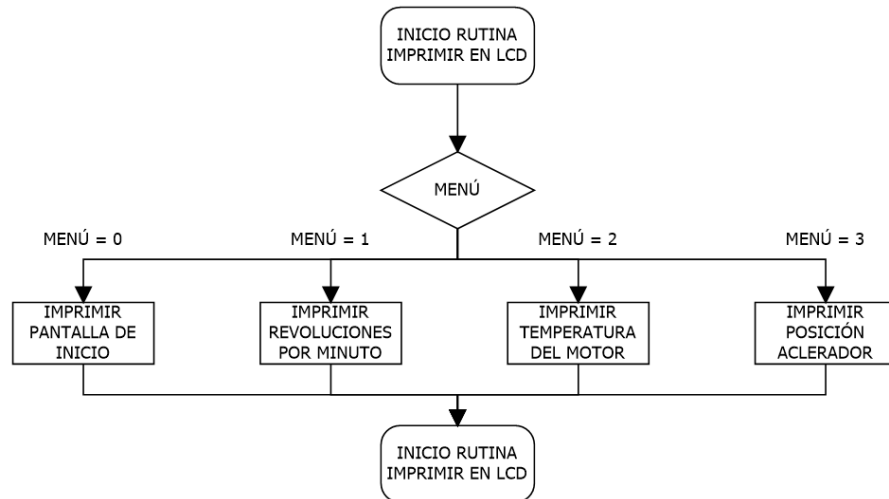


Figura 9.9.1. Diagrama de flujo de la rutina de impresión de valores en LCD (fuente: propia).

9.10. Rutina de cálculo de duty-cycle y avance de encendido

Con esta rutina se puede conocer el porcentaje de tiempo total que debe estar abierto el inyector por cada ciclo del motor, y los grados de avance de encendido. La rutina busca dentro de los mapas de inyección y avance de encendido, los valores adecuados en función del régimen de giro y de la posición del acelerador. Una vez encontrados los valores, se le suma el incremento de duty-cycle debido a una temperatura baja del motor, y su valor se almacena en una variable global. Del mismo modo, también se almacena en una variable global los grados de avance.

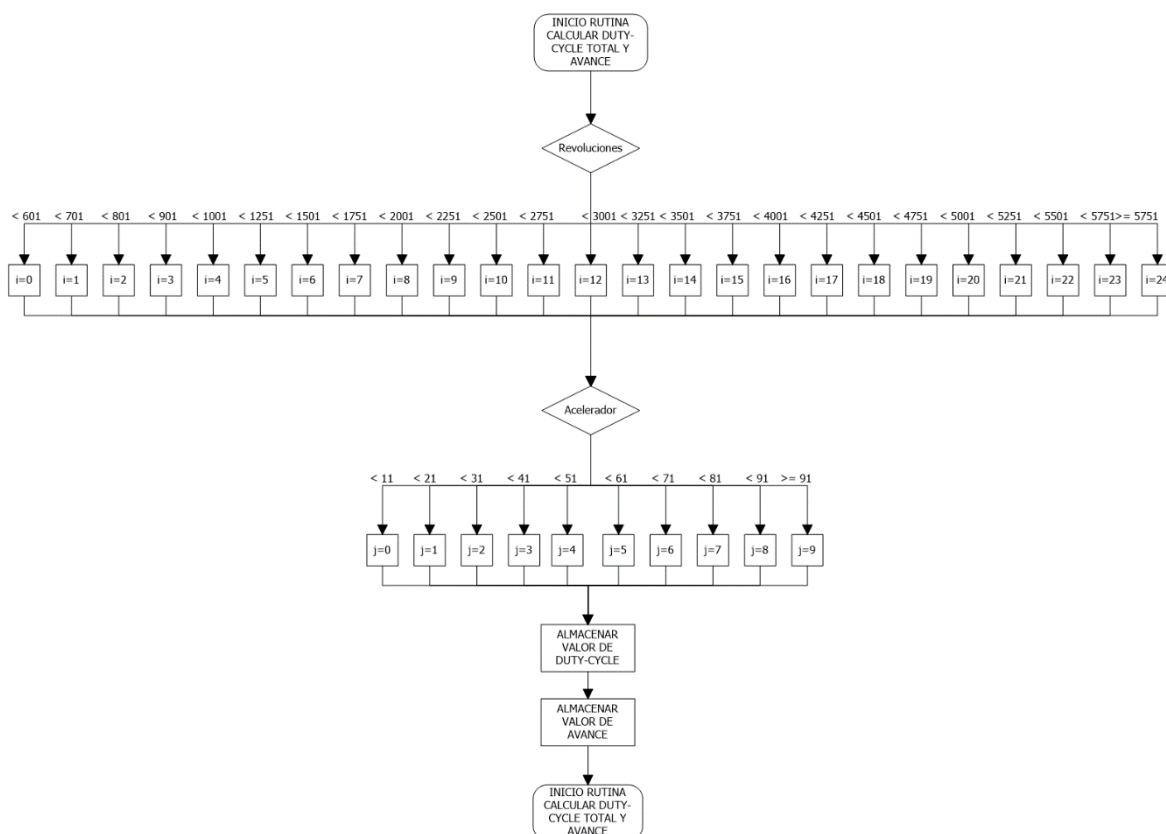


Figura 9.10.1. Diagrama de flujo de la rutina de cálculo del duty-cycle total y encendido (fuente: propia).

9.11. Rutina comunicaciones

Esta rutina permite enviar a través del puerto RS232, las variables globales que se han considerado de mayor interés. Estas variables corresponden a las revoluciones por minuto, la temperatura del motor, la posición del acelerador, el duty-cycle de la inyección y el avance de encendido.

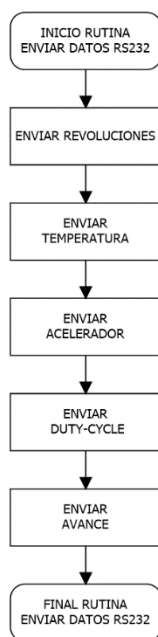


Figura 9.12.1. Diagrama de flujo de la rutina de envío de valores a través de RS232 (fuente: propia).

10. Descripción del Hardware de la FPGA

La FPGA debe ser capaz de generar dos señales: la primera señal, cuya salida es a través del pin D0 y que emula el sensor de posición del cigüeñal y la segunda a través del pin D1 que corresponde al sensor de posición del árbol de levas. Estas señales también son visibles a través de los LEDs que incorpora la placa(LED0 y LED1 respectivamente).

La FPGA cuenta con un reloj de 12 MHz, por lo que se ha decidido utilizar un prescaler, para así simular un régimen de giro cercano al ralenti. Si el motor girase a 600 rpm, daría 10 vueltas por cada segundo y, teniendo en cuenta que el último pulso generado por el sensor del cigüeñal es de mayor anchura que el resto, la señal resultante equivaldría a un tren de 35 pulsos, donde los pulsos 32, 33, 34 y 35 corresponderían al pulso de mayor tamaño. Por tanto, se debe generar una señal con una frecuencia de 350 Hz. Con los datos expuestos se puede calcular el prescaler.

$$Prescaler = \log_2 \left(\frac{12 \cdot 10^6}{350} \right) = 15,06 \quad (\text{Ec. 10.1})$$

Redondeando el prescaler a 15 bits, se obtiene un régimen de giro de 628 rpm. A continuación, se expone una tabla con los regímenes de giro que se conseguirían simular en función del número de bits del prescaler.

RPM	Nº bits
628 rpm	15
1256 rpm	14
2511 rpm	13
5022 rpm	12

Tabla 10.1. Régimen de giro en función del número de bits

11. Simulaciones

En este apartado se expondrán los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con Proteus. Es de vital importancia asegurarse de que los resultados de estas simulaciones concuerdan con los resultados esperados, antes de proseguir con la fabricación de un primer prototipo de pruebas. De esta manera, se reducirá notablemente el impacto económico al detectar posibles fallos, antes de adquirir los componentes necesarios.

11.1. Sensor de revoluciones

La primera simulación en ejecutarse ha sido la del sensor de revoluciones. Esta decisión viene motivada por tratarse de uno de los elementos más críticos del proyecto. Es esencial que las señales procedentes del sensor del cigüeñal y del árbol de levas estén en sincronismo con la inyección y el encendido. Además, estos sensores son utilizados para contar las revoluciones. También se trata de uno de los sensores más complejos de simular y, por ello, se han presentado dos alternativas: una para el prototipo de pruebas, debido a la imposibilidad de disponer de un sensor real, y una segunda alternativa para la versión comercial.

11.1.1. Prototipo de pruebas

Los sensores de revoluciones y posición que se instalarán en el prototipo de pruebas arrojarán una señal almenada, que se obtendrá a partir de un circuito digital. Esta señal consistirá en un tren de pulsos en el que, el pulso treintaidosavo tendrá una anchura del doble de tiempo que los demás.

La forma de obtener este tipo de señal en Proteus, ha sido mediante la suma de dos señales PWM; una de ellas con un duty-cycle del 50 %, y una segunda señal con una frecuencia y con un duty-cycle inferior a la primera (en este caso, con un duty-cycle del 10 % y una frecuencia 35 veces inferior a la de la primera señal). Si se suman ambas señales con un operacional configurado en modo sumador y, con una amplificación lo suficientemente grande como para que se sature el operacional, se obtendrá una señal cuadrada. Sin embargo, en el prototipo de pruebas se obtendrá mediante una FPGA.

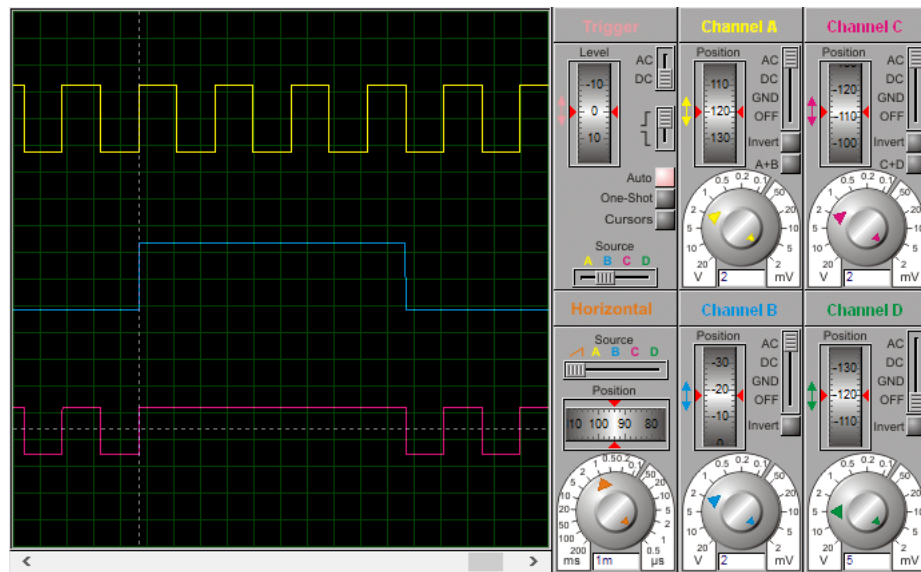


Figura 11.1.1.1. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores (fuente: propia).

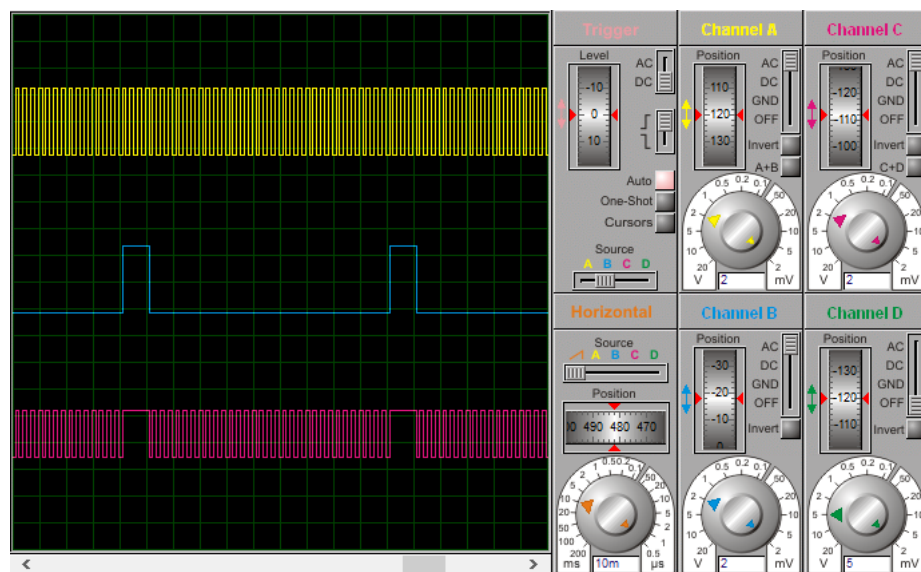


Figura 11.1.1.2. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores (fuente: propia).

El motor cuenta con un sensor ubicado en el árbol de levas, que arroja una segunda señal, y que indica el instante en el que comienza la carrera de admisión, para discernir entre el PMS de esta, del de la carrera de expansión. En la Figura 10.1.1.3 se pudo observar como la señal de este sensor coincide con

el pulso más ancho del sensor del cigüeñal, indicando así que el motor se encuentra en la carrera de admisión. El segundo pulso del sensor de cigüeñal, el cual no está acompañado por un pulso del sensor del árbol de levas, corresponde al inicio de la carrera de expansión.

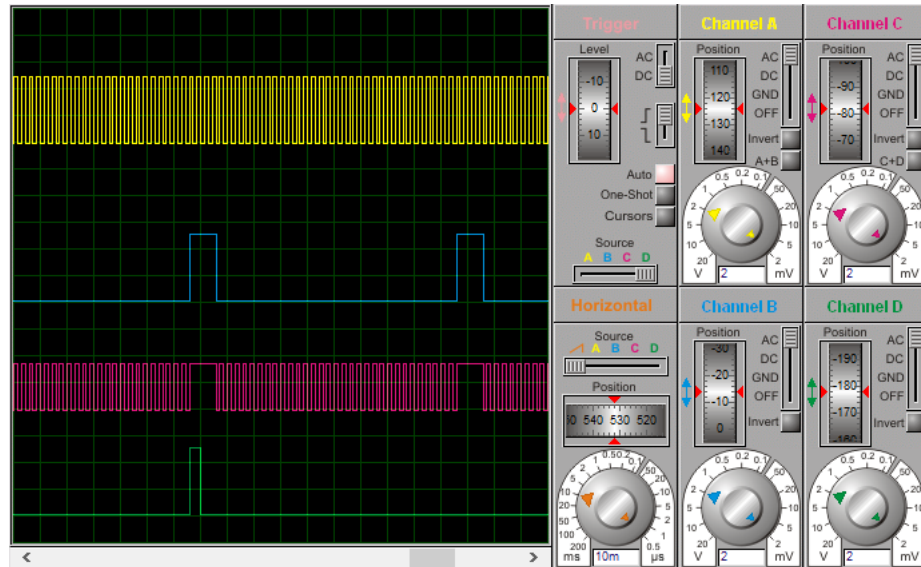


Figura 11.1.1.3. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores. Señal verde: Sensor ubicado en el árbol de levas (fuente: propia).

Lo descrito anteriormente es válido para obtener la señal deseada en Proteus. Sin embargo, para obtener la señal deseada en el laboratorio, se cuenta con una FPGA libre conocida como Alhambra II. El software que se ha utilizado para el desarrollo del lenguaje de descripción, se llama Icestudio y también es libre. No obstante, no permite realizar simulaciones, por lo que el funcionamiento de la FPGA ha tenido que ser probado sin simular, empleando unos LEDs y un prescaler muy alto.

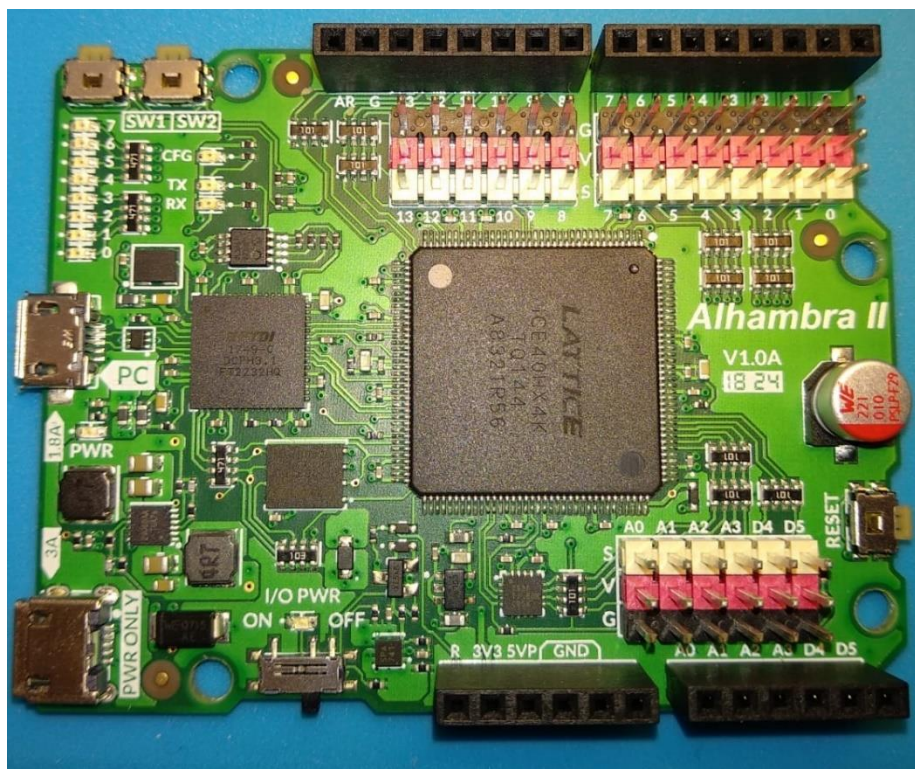


Figura 11.1.1.4. FPGA Alhambra II (fuente: propia).

11.1.2. Versión comercial

En la versión comercial, la señal arrojada por el sensor del árbol de levas, conformarán un tren de senoides, en el que cada senoide corresponderá a un diente del sensor. Sin embargo, la presencia de un diente de mayor tamaño que el resto, provocará que una de estas senoides tenga una frecuencia menor. Por tanto, se obtendrá una señal oscilante con un ciclo de un periodo de mayor tamaño que el resto, tal y como se puede apreciar en la Figura 7.3.1. Debido a la imposibilidad de generar una señal de esta naturaleza en Proteus, se ha optado por simular una senoide, y sumarle una señal almenada correspondiente al pulso provocado por el diente de mayor tamaño.

Por otro lado, la señal proveniente del sensor ubicado en el árbol de levas arrojará un pulso como el mostrado en el apartado anterior, pero con forma senoidal. Sin embargo, se ha utilizado la misma señal que en el apartado anterior. A continuación, se muestran las señales obtenidas con esta técnica.

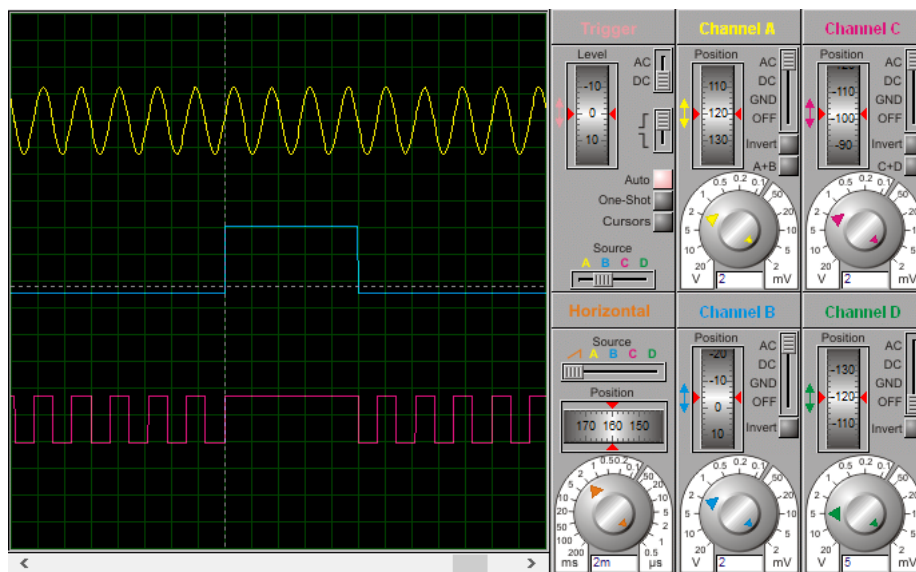


Figura 11.1.2.1. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores (fuente: propia).

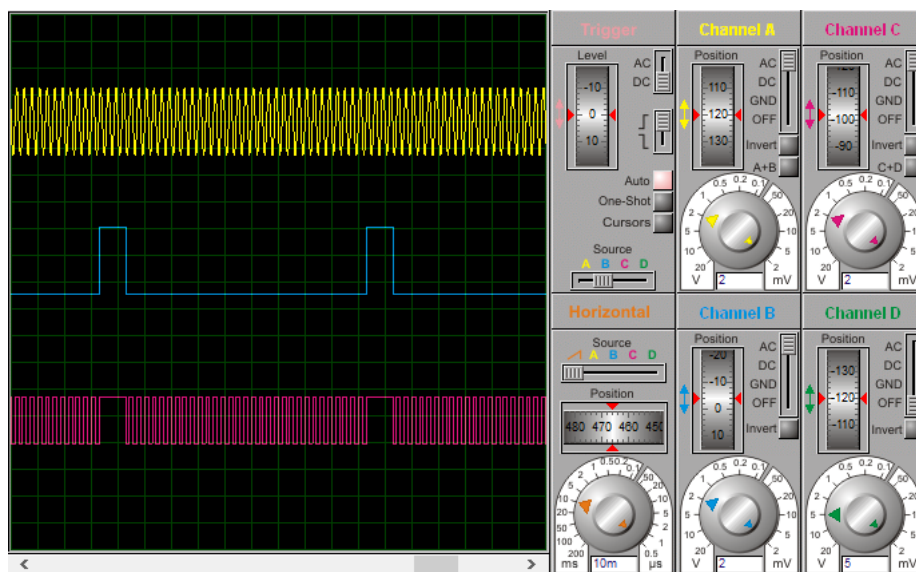


Figura 11.1.2.2. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores (fuente: propia).

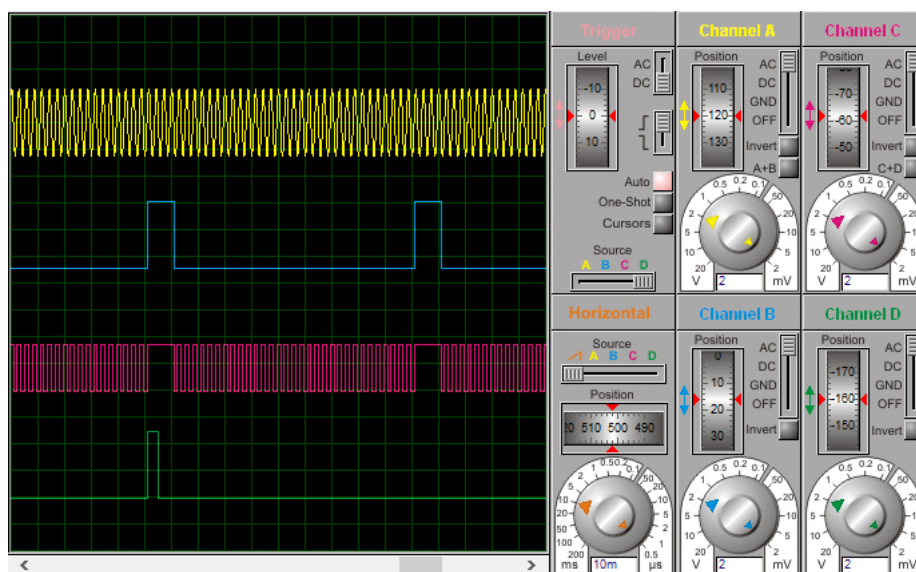


Figura 11.1.2.3. Simulación del sensor de posición del cigüeñal. Señal amarilla: Dientes del sensor del cigüeñal. Señal azul: Diente más ancho del cigüeñal. Señal rosa: Suma de las dos señales anteriores. Señal verde: Sensor ubicado en el árbol de levas (fuente: propia).

11.2. Inyector y encendido

La segunda simulación más importante del proyecto es la de las señales de inyección y encendido. No solo es necesario que estén sincronizadas con el motor, sino que también es importante que hagan frente a la demanda de las condiciones de la marcha, del acelerador o de la temperatura del motor. A continuación, se muestran unas gráficas en las que se puede observar como varía el ancho de pulso correspondiente a la apertura del inyector, al actuar sobre el acelerador o la temperatura del motor, y el avance de encendido.

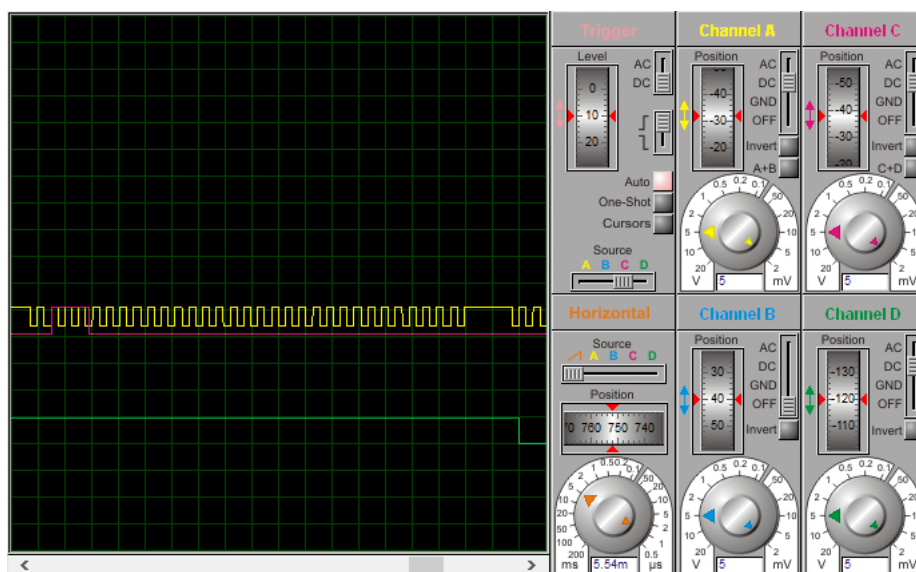


Figura 11.2.1. Simulación del inyector y encendido con el motor a 90 °C y acelerador al 0 %. Señal amarilla: Sensor de posición del cigüeñal. Señal rosa: Inyector. Señal verde: Encendido (fuente: propia).

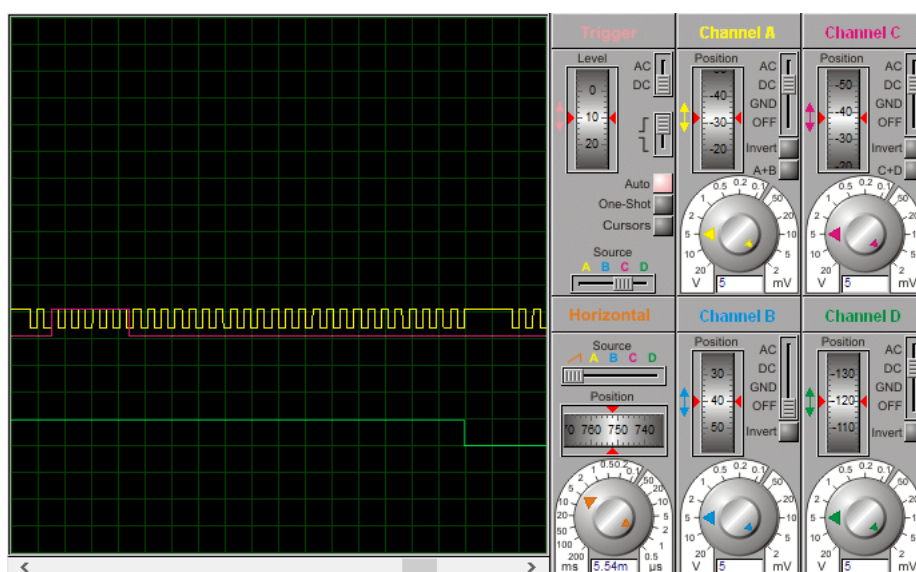


Figura 11.2.2. Simulación del inyector y encendido con el motor a -20 °C y acelerador al 100 %. Señal amarilla: Sensor de posición del cigüeñal. Señal rosa: Inyector. Señal verde: Encendido (fuente: propia).

También se puede observar como la inyección de gasolina se produce durante la carrera de admisión, y el encendido al inicio de la expansión o ligeramente antes.

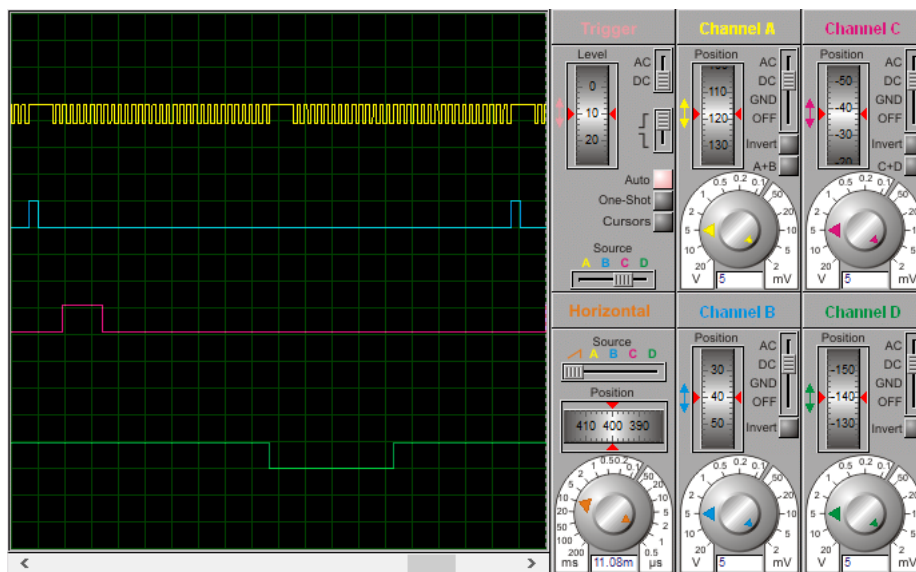


Figura 11.2.3. Simulación del inyector y encendido con el motor a 90 °C y acelerador al 0 %. Señal amarilla: Sensor de posición del cigüeñal. Señal azul: Sensor del árbol de levas. Señal rosa: Inyector. Señal verde: Encendido (fuente: propia).

Finalmente, es interesante conocer el valor de la corriente que atravesará el inyector y el primario de la bobina de encendido, para ver si estos se encuentran dentro de los parámetros adecuados. Pese a que las simulaciones que puede efectuar Proteus van encaminadas a los circuitos digitales, el software incorpora herramientas para comprobar algunas magnitudes analógicas, entre ellas el valor de las intensidades de los diferentes elementos que componen un circuito. No obstante, los circuitos de potencia se han tenido que simular por separado, para no saturar la memoria.

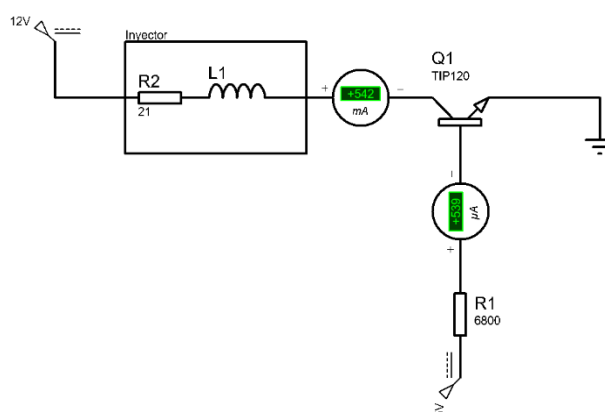


Figura 11.2.4. Simulación del circuito de inyección (fuente: propia).

Al simular el circuito de inyección, se puede observar como el transistor puede aportar hasta 542 mA al inyector, valor que se considera suficiente. También se puede comprobar como la corriente de la base queda limitada a 529 μ A, valor que es perfectamente asumible por el microcontrolador.

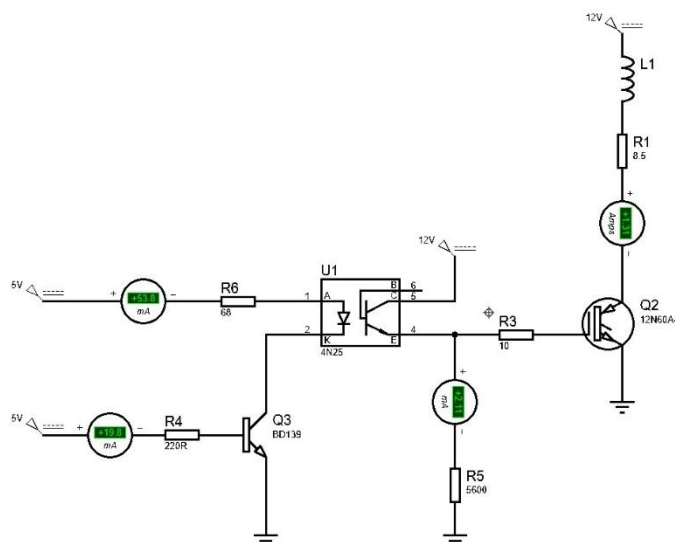


Figura 11.2.5. Simulación del circuito de encendido (fuente: propia).

La simulación del circuito de encendido muestra como la corriente de polarización del LED del optoacoplador, es de 54,8 mA y, por tanto, inferior a los 60 mA que indicaba el datasheet como valor máximo al que se podía someter este elemento. También se puede comprobar como la corriente que suministra el microcontrolador es de 19,8 mA (inferior a los 25 mA que puede suministrar como máximo), y que la corriente que aporta el optoacoplador, a través de su transistor interno, es de 2,11 mA (obviando la corriente de carga de la compuerta del transistor, debido a su escasa magnitud), es decir, inferior a los 50 mA que estaban fijados como máximo. Finalmente, el aspecto más reseñable es el de la corriente que se suministra al primario de la bobina de encendido, que llega a alcanzar 1,31 A, cuando la batería se encuentra a 12 V. Sin embargo, debemos tener presente que la tensión de la batería puede alcanzar los 13,2 V si ésta se encuentra en un estado de carga elevado, y puede llegar a superar los 14 V si la tensión proviene del alternador. Por tanto, bajo estas circunstancias, la corriente que se suministraría al primario de la bobina de encendido sería incluso mayor. No obstante, es conveniente que en las simulaciones se tenga en cuenta el caso más desfavorable, que es el que se ha expuesto.

También se ha simulado el circuito de encendido con PSIM. En esta simulación se puede corroborar como la tensión a la salida del secundario de la bobina de encendido, alcanza valores de 17 kV.

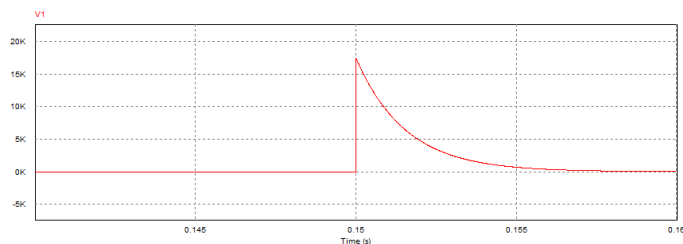


Figura 11.2.1. Simulación del circuito de encendido. Señal roja:
Diferencia de potencial entre los electrodos de la bujía (fuente: propia).

11.3. Sensor de temperatura

El sensor de temperatura debe trabajar en un rango de valores comprendidos entre los -20°C y los 120°C . Esta temperatura es regulable mediante un potenciómetro. A continuación, se exponen los resultados de la simulación, con el potenciómetro que emula el sensor de temperatura del motor al 0 % (Figura 10.3.1.) y al 100 % (Figura 10.3.2.).

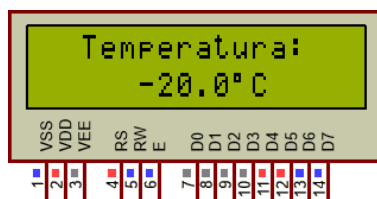


Figura 11.3.1. Simulación del sensor de temperatura a -20°C (fuente: propia).

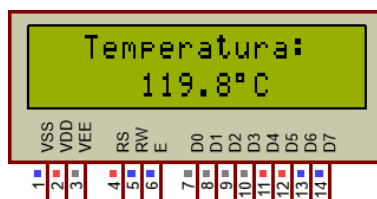


Figura 11.3.2. Simulación del sensor de temperatura a $119,8^{\circ}\text{C}$ (fuente: propia).

11.4. Acelerador

El procedimiento para simular el potenciómetro del acelerador, ha sido similar al de la temperatura. A continuación, se exponen las lecturas del acelerador cuando éste está al 0 % (Figura 10.4.1.) y cuando está al 100 % (Figura 10.4.2.).

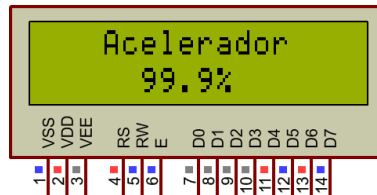


Figura 11.4.1. Simulación del acelerador al 100 % (fuente: propia).

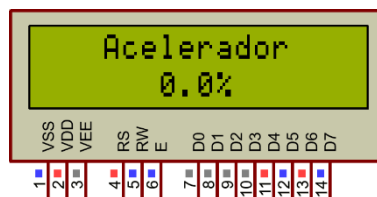


Figura 11.4.2. Simulación del acelerador al 0 % (fuente: propia).

11.5. Pantalla LCD

El display se podrá controlar a través de un pulsador. Al actuar sobre el pulsador, se podrá navegar por el menú de la pantalla, pudiendo alternar entre varias medidas. Al encender la placa, se ha optado por mostrar la autoría del proyecto. En el momento en el que se acciona el pulsador, se puede alternar entre la lectura de las revoluciones por minuto, la temperatura del motor, o la posición del pedal del acelerador. De esta forma, una vez que el usuario inicia la navegación, mostrando diferentes lecturas en la pantalla, es imposible retornar a la de inicio, al menos que se reinicie la placa. Las diferentes pantallas que puede arrojar el display, son mostradas a continuación.



Figura 11.5.1. Menú inicial (fuente: propia).

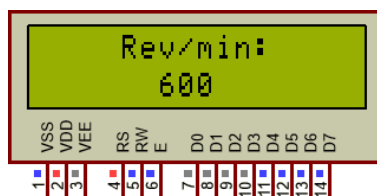


Figura 11.5.2. Menú de régimen de giro (fuente: propia).

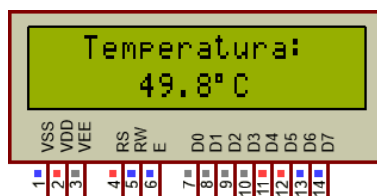


Figura 11.5.3. Menú de temperatura del motor (fuente: propia).

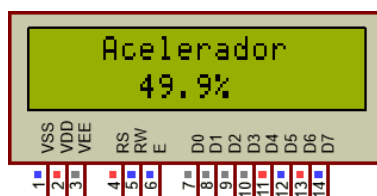


Figura 11.5.4. Menú de posición del acelerador (fuente: propia).

11.6. Comunicaciones

Para llevar a término las simulaciones de las comunicaciones mediante el puerto RS232, se ha creado un puerto virtual a través del programa VSPE. El puerto virtual se ha configurado en el COM4. Además, se ha utilizado Hercules para visualizar los datos del puerto serie. Los datos que se envían por el puerto serie son las revoluciones por minuto, la temperatura del motor, la posición del acelerador, y los grados de avance del encendido.

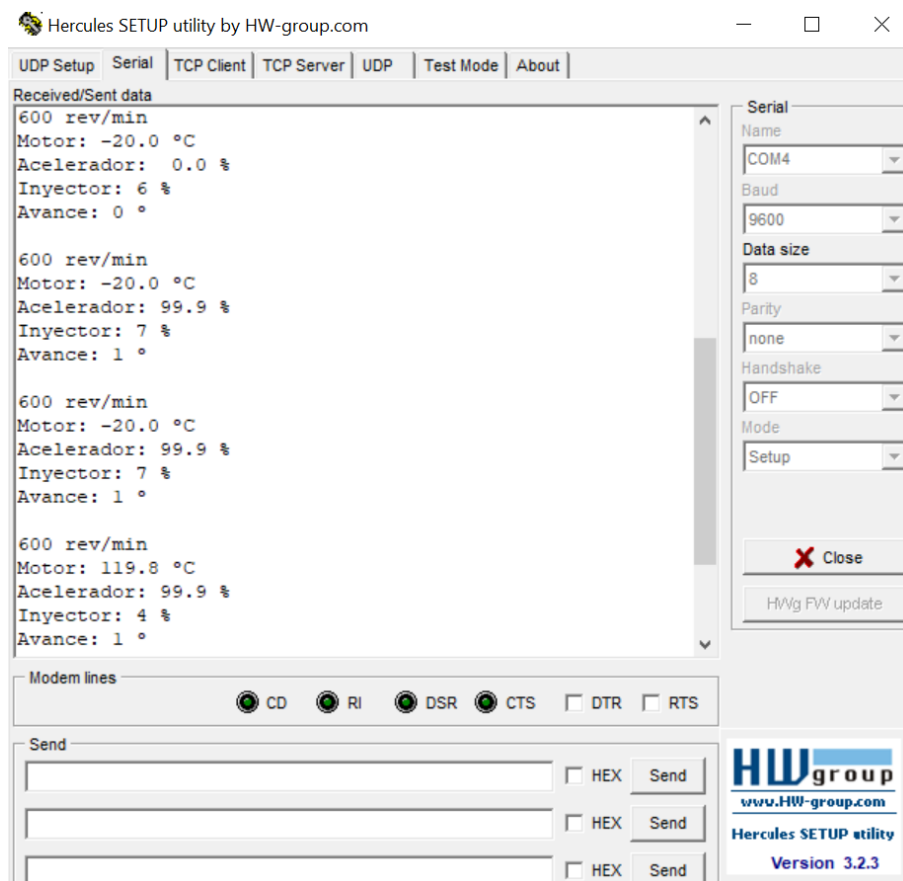


Figura 11.6.1. Datos recibidos por el puerto serie (fuente: propia).

12. Comunicaciones

La unidad de control electrónico diseñada, cuenta con un puerto serie, para transmitir las variables que se han considerado de interés. Estas variables son las revoluciones por minuto, la temperatura del motor, la posición del acelerador, el duty-cycle del inyector y los grados de avance del encendido.

El estándar de comunicación utilizado es el EIA/TIA RS-232C [40], el cual establece que el 0 lógico debe corresponder a una señal de 12 V y el 1 lógico a una señal de -12 V. Como el microcontrolador no puede generar estas tensiones por sí mismo, ha sido necesario la instalación de un integrado (MAX232) que permite la adecuación a estos valores. Del mismo modo, se ha configurado la velocidad de la comunicación a 9600 baudios y no se ha creído conveniente incluir protocolos de detección de errores de transmisión, como es el de bit de paridad. Esta última decisión se ha tomado con la finalidad de evitar errores en la simulación. Sin embargo, en el prototipo comercial debe incluirse.

La lectura de los valores se realiza a través de un software denominado Hércules, que permite imprimir los datos que llegan al ordenador por diferentes periféricos, entre ellos el puerto serie. Como los ordenadores actuales no disponen de este puerto, es necesario adquirir un conversor USB – RS232. En versiones sucesivas de esta unidad de control electrónico, el puerto RS232 será sustituido por un puerto USB y un módulo bluetooth.

13. Normativa

La versión comercial de la unidad de control electrónico diseñada, deberá respetar la normativa europea y nacional existente. Dicha normativa afecta principalmente a las emisiones de gases contaminantes (óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, monóxido de carbono y partículas) y a la compatibilidad electromagnética. También debiera respetarse la normativa referente a los plazos de garantía y calidad exigidos por el marcado de Conformidad Europea (marcado CE).

Del mismo modo, si la unidad de control electrónico se exportase fuera de la Unión Europea, se deberá velar por el cumplimiento del marco legal de aquellos terceros países a los que se exporte. No obstante, la normativa europea acostumbra a ser una de las más avanzadas y garantistas para el consumidor.

13.1. Normativa relativa a las emisiones de gases contaminantes

La Comisión Europea y el Parlamento Europeo se han puesto como objetivo reducir los niveles de gases contaminantes emitidos a la atmósfera, hasta el punto de convertirse en una de las legislaciones más ambiciosas y restrictivas en esta materia. En las últimas décadas, se han ido aprobando leyes que limitan cada vez más la cantidad de emisiones que pueden generar aquellos vehículos que se comercialicen dentro de los estados miembros, hasta tal punto, de que se prevé que se prohíban estos vehículos en unas décadas. La normativa vigente en esta materia es la siguiente.

- REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones y sobre el acceso a la información relativa a la reparación de los vehículos, y por la que se modifican las Directivas 72/306/CEE y .../.../CE (Euro 5). Actualmente, esta normativa no afecta a motocicletas. Sin embargo, se ha marcado el año 2020 como fecha de entrada en vigor para este tipo de vehículos [28].
- DIRECTIVA 2002/80/CE DE LA COMISIÓN de 3 de octubre de 2002 por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor (Euro 4) [29].
- DIRECTIVA 98/69/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo (Euro 3) [30].

13.2. Normativa relativa a la compatibilidad electromagnética

También debe ser tenida en cuenta la normativa referente a la emisión de señales electromagnéticas, especialmente por las producidas en el circuito de encendido. La legislación aprobada al respecto es la siguiente:

- Directiva 2009/19/CE de la Comisión, de 12 de marzo de 2009, por la que se modifica, para adaptarla al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo, relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos [31].
- Directiva 2006/28/CE de la Comisión, de 6 de marzo de 2006, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques [32].
- Directiva 2005/83/CE de la Comisión, de 23 de noviembre de 2005, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, los anexos I, VI, VII, VIII, IX y X de la Directiva 72/245/CEE del Consejo, relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos [33].
- Directiva 2005/49/CE de la Comisión, de 25 de julio de 2005, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos, y la Directiva 70/156/CEE del Consejo, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques [34].
- Corrección de errores de la Directiva 2004/104/CE de la Comisión, de 14 de octubre de 2004, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de los vehículos a motor y de sus remolques [35].
- Directiva 2004/104/CE de la Comisión, de 14 de octubre de 2004, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de los vehículos a motor y de sus remolques [36].
- Corrección de erratas del Real Decreto 138/1989, de 27 de enero, por el que se aprueba el Reglamento sobre Perturbaciones Radioeléctricas e Interferencias [37].
- Real Decreto 138/1989, de 27 de enero, por el que se aprueba el Reglamento sobre Perturbaciones Radioeléctricas e Interferencias [38].

13.3. Otra normativa aplicable

Además de lo mencionado, todos los productos que se comercialicen dentro de la Unión Europea, deben cumplir el mercado CE. El mercado CE se apoya en la directiva europea 93/68/CEE. Este mercado es obligatorio para comercializar equipos eléctricos dentro de la Unión Europea y, para obtenerlo, la unidad de control electrónico deberá ser examinada por un organismo autorizado de la Unión Europea, y en donde se velará por el cumplimiento de la normativa anteriormente descrita y por la seguridad y durabilidad del producto [39].

Finalmente, dado que se ha establecido un puerto de comunicación, se debe cumplir el estándar RS232. Dicho estándar fija, entre otras cosas, los valores que deben tener las tensiones del puerto de comunicación [40].

14. Impacto ambiental

Uno de los principales causantes de la polución del aire, especialmente en las ciudades, es la industria del automóvil. En diversas capitales europeas se están aprobando legislaciones para limitar el uso de los vehículos con motores de combustión interna, para así mejorar la calidad del aire dentro de las urbes. Sin embargo, según la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), la sustitución de aquellos vehículos de más de 15 años, reduciría un 29 % las emisiones de CO₂ [41]. Aquí es donde la electrónica juega un papel especial ya que, gracias a ella, se han conseguido diseñar coches más eficientes y menos contaminantes.

Sin embargo, la unidad de control electrónico diseñada, precisaría de más sensores (sonda lambda, caudalímetro, sensor de temperatura exterior, sensor de presión atmosférica, etc.) que permitieran realizar un control y una regulación más exacta de los tiempos de inyección y encendido. No obstante, esto se salía del alcance del proyecto, debido al número de medios y horas requeridos. Por otro lado, será necesario incorporar elementos que permitan reducir las emisiones. Un ejemplo muy usado es el catalizador o la válvula EGR.

Aunque la legislación aplicable a motocicletas y ciclomotores acostumbra a ser más laxa que la aplicable a vehículos automóviles, se debe tener como objetivo la reducción de las emisiones. Además, se prevé que la normativa EURO5 incluya a ciclomotores y motocicletas a partir del año 2020. No obstante, la comisión europea recomienda el uso de motocicletas y ciclomotores para el transporte personal, en contraposición al coche, especialmente en recorridos urbanos, ya que permite reducir los atascos y las emisiones, al transportarse una menor cantidad de peso por persona.

15. Planificación y diagrama de Gantt

Se ha planificado una duración del proyecto de aproximadamente 6 meses. Previamente, se habían realizado pequeños ejemplos, como primera toma de contacto con el compilador CCS. Sin embargo, la fecha oficial de inicio se estableció el 14 de enero de 2019.

Los primeros 40 días han sido programados para la búsqueda de la documentación técnica necesaria y para la redacción de un anteproyecto en el que se hará una introducción en donde se explique el funcionamiento básico de un motor de combustión interna, así como las diferentes tecnologías que han ido apareciendo en el mercado, haciendo un breve recorrido histórico. De esta forma, se sentarán las bases para el desarrollo llevado a cabo por el proyectista. También se definirá el alcance del proyecto y su viabilidad.

Se ha previsto que el diseño del circuito comience a finales de febrero. Los diseños de los esquemas y el desarrollo del software, focalizarán la mayor parte del trabajo. Se estima que se tarden 3 semanas en diseñar los esquemas, una semana en buscar los componentes y un mes en desarrollar el software. Aunque lo lógico es que se siga este orden, puede darse el caso de que el plan ideado sufra algún tipo de alteración y, en algún momento puntual, se trabaje de manera indistinta entre el desarrollo del software y del hardware, especialmente cuando se deban ejecutar las simulaciones. De manera paralela, se consultarán los estándares y la legislación, para velar por el cumplimiento de toda la normativa vigente, especialmente en materia medioambiental y de compatibilidad electromagnética, ya que es la más restrictiva.

Se estima que la memoria se redacte durante el mes de mayo, a excepción de la introducción que ya habrá sido redactada. La redacción se hará en base a la normativa y el estándar publicada por la EEBE, por ello, se utilizará una plantilla disponible en la página web de la universidad [42]. Durante la redacción de la memoria, se normalizarán los esquemas, cálculos e imágenes presentadas.

El mes de junio va a centrarse en el montaje y prueba del prototipo, así como en la preparación de la presentación y de las cuestiones que puedan ser planteadas por el tribunal.

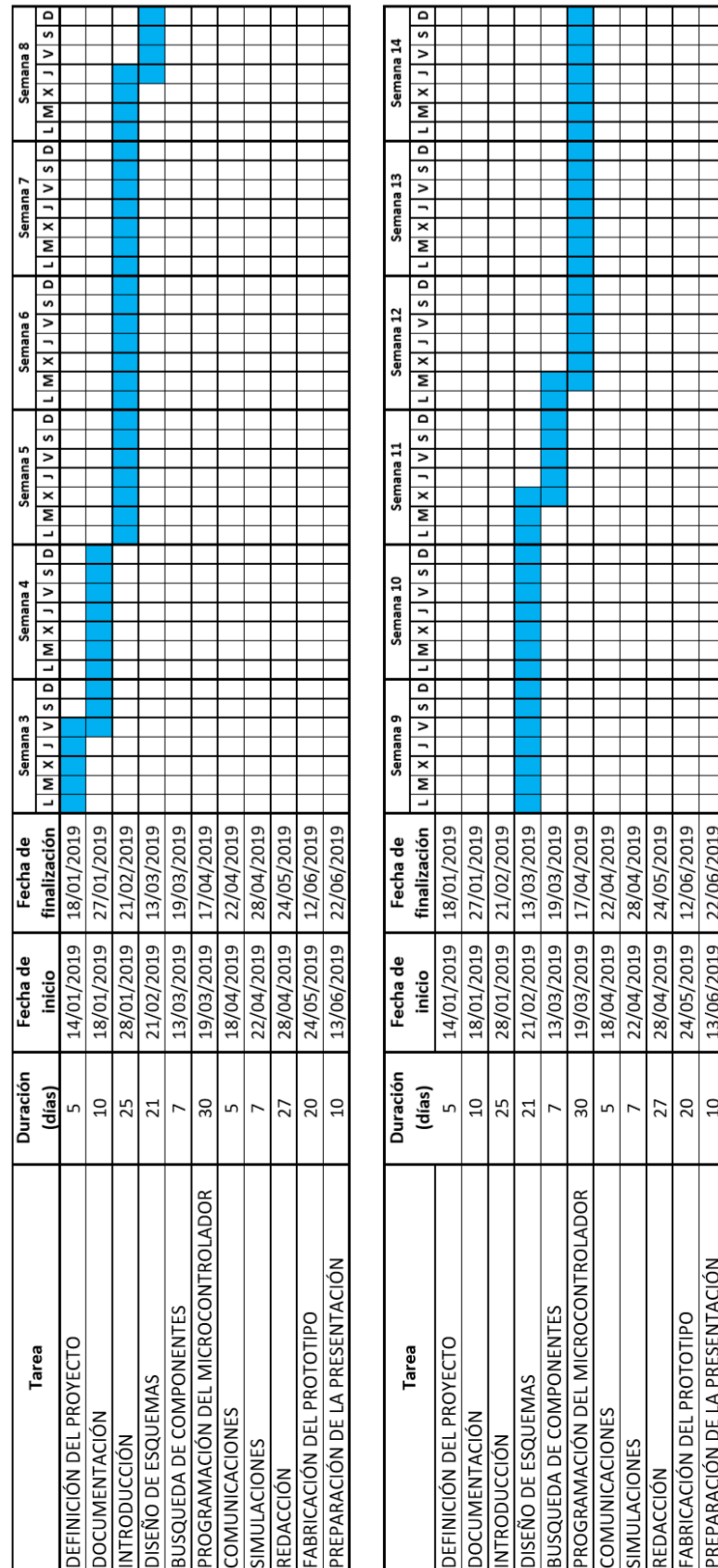


Figura 14.1. Diagrama de Gantt. Primera parte (fuente: propia).

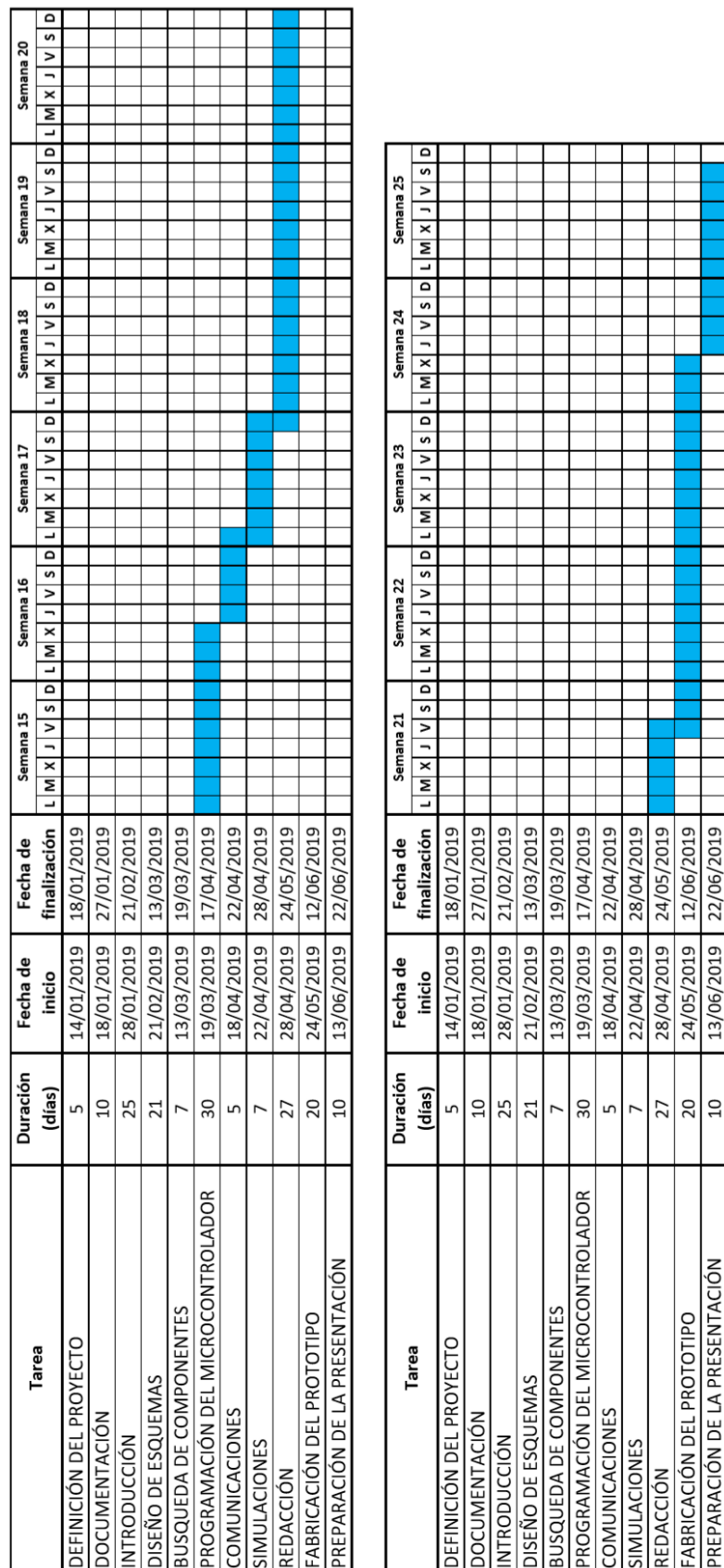


Figura 15.2. Diagrama de Gantt. Segunda parte (fuente: propia).

16. Conclusiones

En este proyecto se ha pretendido plasmar algunos de los conocimientos adquiridos durante los estudios del grado. También ha sido de gran ayuda para profundizar en algunos campos de la electrónica, especialmente en la programación de microcontroladores.

Dada la naturaleza del proyecto, ha sido necesario utilizar conceptos de diferentes áreas de la ingeniería. Este proyecto combina aspectos tan diversos como la adquisición de señales, provenientes del acelerador y del sensor de temperatura; la programación de microcontroladores para procesar esas señales y controlar el circuito; la electrónica de potencia para generar un valor suficientemente alto como para ionizar el aire existente entre los electrodos de la bujía y provocar el encendido; y las comunicaciones. Algunos de los aspectos mencionados contienen una dificultad intrínseca, como es el caso del circuito del encendido, que supone un alto riesgo para la parte de control por las tensiones y el ruido que es capaz de inducir.

Por otro lado, el algoritmo desarrollado, supera con creces las habilidades que fueron adquiridas durante los estudios de grado. Es un algoritmo complejo, de casi 600 líneas de código, en el que se han programado 4 temporizadores y 3 interrupciones externas, además de las comunicaciones y el display. No obstante, se ha utilizado un compilador que facilita enormemente las tareas de programación frente al usado durante los estudios de grado. Del mismo modo, se ha utilizado Proteus, que facilita enormemente las labores de diseño, en parte, por el potente simulador digital que incorpora. Sin embargo, este software no ha sido utilizado durante la carrera y, aunque el proyectista conocía de su existencia, ha tenido que aprender a usarlo.

Finalmente y, a modo de resumen, se puede decir que el proyecto realizado contiene una gran transversalidad, ya que abarca múltiples áreas de la ingeniería electrónica; que requiere de una fuerte labor de documentación, para conocer el funcionamiento de un motor de combustión interna, y que entraña un montón de complejidades, especialmente en el desarrollo del software, en el aislamiento del circuito de potencia, y en el hecho de que sea de un proyecto muy opaco, debido a que los fabricantes de este tipo de tecnología cuidan muy recelosamente la información sobre sus mapas de inyección y encendido, entre otros aspectos de sus diseños.

17. Posibles mejoras

El circuito diseñado corresponde a una unidad de control electrónico de pruebas y, por tanto, un modelo no comercial. Un modelo comercial debería incluir un segundo optoacoplador en el circuito de inyección, para así aislar al circuito de cualquier interferencia absorbida por el cableado del inyector, y del ruido provocado por la bobina de éste.

También se deberían incorporar más sensores que permitieran realizar una mejor regulación de la mezcla, especialmente un caudalímetro y una sonda lambda, para medir correctamente la cantidad de aire que ingresa al motor, y la concentración de oxígeno presente en los gases que se desprenden de la combustión. Además, se deberá ajustar los mapas de inyección y encendido en un banco de pruebas para motores. Este aspecto es de vital importancia, puesto que la normativa en materia de contaminación y emisión de gases contaminantes, es cada vez más restrictiva.

Se ha dotado a la placa de conectividad, a través de RS232, y un conversor de RS232 a USB. No obstante, se debe considerar la sustitución de ésta por una forma de comunicación más actualizada, como puede ser la comunicación vía USB y bluetooth. De esta forma, la conectividad con la ECU sería más accesible.

18. Bibliografía

- [1]. Ament, P. Wheel History - Invention of the Wheel. En: [en línea]. [consulta: 3 enero 2019]. Disponible en: <http://www.ideafinder.com/history/inventions/wheel.htm>.
- [2]. Ecured. Motor Wankel - EcuRed. En: [en línea]. [consulta: 4 enero 2019]. Disponible en: https://www.ecured.cu/Motor_Wankel.
- [3]. Motor1.com. Mazda RX-9 2019 render: el motor rotativo, cada vez más cerca. En: [en línea]. [consulta: 4 enero 2019]. Disponible en: <https://es.motor1.com/news/249479/mazda-rx9-render-motor-rotativo/>.
- [4]. Mazda España. Motor Rotativo. En: [en línea]. [consulta: 4 enero 2019]. Disponible en: <https://www.mazda.es/mazda-spirit/tecnologia/motor-rotativo/>.
- [5]. E-ducative. 4. Comparación entre los motores Otto y Diesel. En: [en línea]. [consulta: 5 enero 2019]. Disponible en: http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4932/html/4_comparacin_entre_los_motores_otto_y_diesel.html.
- [6]. Universitat Politècnica de València. motor alternativo – Procedimientos de #construcción. En: [en línea]. [consulta: 6 enero 2019]. Disponible en: <https://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/tag/motor-alternativo/>.
- [7]. Oficina Española de Patentes y Marcas. Grandes Inventores - Museo Virtual - Oficina Española de Patentes y Marcas. En: [en línea]. [consulta: 7 enero 2019]. Disponible en: http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Lenoir,Jean-JosephEtienne.xml.
- [8]. SSORTMEN. Nikolaus August Otto: Inventor Of The Internal Combustion Engine. En: [en línea]. [consulta: 7 enero 2019]. Disponible en: <http://www.essortment.com/nikolaus-august-otto-inventor-internal-combustion-engine-21765.html>.
- [9]. González Calleja, D. *Motores Térmicos y sus Sistemas Auxiliares*. 1ª. Madrid: Paraninfo, 2013. ISBN 978-84-9732-847-0.
- [10]. Valve Timing Diagram of Two Stroke and Four Stroke Engine - Mechanical Booster. En: [en línea]. [consulta: 20 enero 2019]. Disponible en: <http://www.mechanicalbooster.com/2017/12/valve-timing-diagram-two-stroke-and-four-stroke-engine.html>.
- [11]. Martín Blas, T. et al. Ciclo de Otto. En: [en línea]. [consulta: 17 febrero 2019]. Disponible en: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/termo2p/otto.html>.
- [12]. Daniel M. Sistemas de encendido. El ruptor. En: [en línea]. 2014. [consulta: 26 enero 2019]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/ruptor.htm>.
- [13]. Daniel M. Sistema de encendido, regulador de avance al encendido. En: [en línea]. 2014. [consulta: 25 enero 2019]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/regvacio.htm>.

- [14]. Daniel M. Encendido electrónico sin contactos. En: [en línea]. 2014. [consulta: 26 enero 2019]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/encendido-electronico-sin-contactos.htm>.
- [15]. Daniel M. Encendido electrónico integral. En: 2014 [en línea]. [consulta: 10 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/encendido-electronico-integral.htm>.
- [16]. Martínez, P., Siavicha, B. y Teneseca, J. Diseño De Un Controlador Avanzado Basado En Redes Neuronales Para La Gestión De La Mezcla Aire-Gasolina En Un Motor Alternativo [en línea]. Universitat Politècnica de Catalunya, 2000. ISBN 8469957481. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1774/13/UPS-CT002050.pdf>.
- [17]. Daniel M. Inyección de gasolina, K-jetronic - Funcionamiento. En: [en línea]. 2014. [consulta: 5 febrero 2019]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/inyeccion-k-jetronic.htm>.
- [18]. Pardiñas Alvite, J. Sistemas Auxiliares del Motor. Pozuelo de Alarcón, Madrid: Editex S. A., 2012. ISBN 978-84-9003-289-3.
- [19]. Learn Engine Management Basics. En: [en línea]. [consulta: 17 febrero 2019]. Disponible en: <https://www.enginetuner.com/learn-engine-management/>.
- [20]. PIC 16F87XA Datasheet. En: [en línea]. [consulta: 29 abril 2019]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>
- [21]. PIC PIC18F2455/2550/4455/4550 Datasheet. En: [en línea]. [consulta: 29 abril 2019]. Disponible en: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632b.pdf>
- [22]. Diotronic. LED ROJO 3MM 5CD 2V4. Descripción. En: [en línea]. [consulta: 30 abril 2019]. Disponible en: https://diotronic.com/088052-led-rojo-3mm-5cd-2v4_162/
- [23]. Polinar Inocente, L., Martínez Villanueva, J.L., Hinostroza Palomino J.D. Elaboración de un modelo de banco de pruebas para el diagnóstico de computadoras automotrices en un motor toyota. En: [en línea] Instituto de Educación Superior Tecnológica - Escuela de Ingeniería Autotróica. [consulta: 1 mayo 2019]. Disponible en: http://repositorio.avansys.edu.pe/bitstream/AVANSYS/34/1/Polinar_Martinez_%26_Hinostroza.pdf
- [24]. TIP120. Datasheet. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TIP120-D.PDF>
- [25]. Casermovil. Maquinaria del automóvil. Sistemas de inyección de gasolina. En: [en línea]. [consulta: 1 mayo 2019]. Disponible en: http://mestreacasa.gva.es/c/document_library/get_file?folderId=500002768422&name=DLFE-316654.pdf

- [26]. BY251 - BY255. Datasheet. En: [en línea]. [consulta: 2 mayo 2019]. Disponible en: <http://www.soloelectronica.net/PDF/24%20a%2012/BY251-5.pdf>
- [27]. 4N25. Datasheet. En: [en línea]. [consulta: 2 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>
- [28]. REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones y sobre el acceso a la información relativa a la reparación de los vehículos, y por la que se modifican las Directivas 72/306/CEE y .../.../CE. En: [en línea]. [consulta: 3 mayo 2019]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52005PC0683&from=PL>
- [29]. DIRECTIVA 2002/80/CE DE LA COMISIÓN de 3 de octubre de 2002 por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 70/220/CEE del Consejo relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor. En: [en línea]. [consulta: 3 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2002/291/L00020-00056.pdf>
- [30]. DIRECTIVA 98/69/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 13 de octubre de 1998 relativa a las medidas que deben adoptarse contra la contaminación atmosférica causada por las emisiones de los vehículos de motor y por la que se modifica la Directiva 70/220/CEE del Consejo. En: [en línea]. [consulta: 3 mayo 2019]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:ES:PDF>
- [31]. Directiva 2009/19/CE de la Comisión, de 12 de marzo de 2009, por la que se modifica, para adaptarla al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo, relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos. En: [en línea]. [consulta: 5 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2009-80431>
- [32]. Directiva 2006/28/CE de la Comisión, de 6 de marzo de 2006, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques. En: [en línea]. [consulta: 5 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2006-80421>
- [33]. Directiva 2005/83/CE de la Comisión, de 23 de noviembre de 2005, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, los anexos I, VI, VII, VIII, IX y X de la Directiva 72/245/CEE del Consejo, relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos. En: [en línea]. [consulta: 5 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2005-82299>

[34]. Directiva 2005/49/CE de la Comisión, de 25 de julio de 2005, por la que se modifican, para su adaptación al progreso técnico, la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos, y la Directiva 70/156/CEE del Consejo, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques. En: [en línea]. [consulta: 5 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2005-81354>

[35]. Corrección de errores de la Directiva 2004/104/CE de la Comisión, de 14 de octubre de 2004, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de los vehículos a motor y de sus remolques. En: [en línea]. [consulta: 6 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2005-80410>

[36]. Directiva 2004/104/CE de la Comisión, de 14 de octubre de 2004, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 72/245/CEE del Consejo relativa a las interferencias de radio (compatibilidad electromagnética) de los vehículos y por la que se modifica la Directiva 70/156/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de los vehículos a motor y de sus remolques. En: [en línea]. [consulta: 6 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2004-82649>

[37]. Corrección de erratas del Real Decreto 138/1989, de 27 de enero, por el que se aprueba el Reglamento sobre Perturbaciones Radioeléctricas e Interferencias. En: [en línea]. [consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1989-4747>

[38]. Real Decreto 138/1989, de 27 de enero, por el que se aprueba el Reglamento sobre Perturbaciones Radioeléctricas e Interferencias. En: [en línea]. [consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1989-3196>

[39]. DIRECTIVA 93/68/CEE DEL CONSEJO de 22 de Julio de 1993 por la que se modifican las Directivas 87/404/CEE (recipientes a presión simples), 88/378/CEE (seguridad de los juguetes), 89/106/CEE (productos de construcción), 89/336/CEE (compatibilidad electromagnética), 89/392/CEE (máquinas), 89/686/CEE (equipos de protección individual), 90/384/CEE (instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático), 90/385/CEE (productos sanitarios implantables activos), 90/396/CEE (aparatos de gas), 91/263/CEE (equipos terminales de telecomunicación), 92/42/CEE (calderas nuevas de agua caliente alimentadas con combustibles líquidos o gaseosos), y 73/23/CEE (material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión). En: [en línea]. [consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:31993L0068&from=ES>

[40]. The RS-232 Standard. Omega En: [en línea]. [consulta: 7 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.omega.co.uk/techref/pdf/RS-232.pdf>

[41]. La sustitución de un millón de coches con 15 años reduciría un 29% de las emisiones de CO2. EUROPA PRESS. En: [en línea]. [consulta: 10 mayo 2019]. Disponible en: <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-sustitucion-millon-coches-15-anos-reduciria-29-emisiones-co2-20190520113130.html>

[42]. Normativa y plantilla de la memoria. EEBE. En: [en línea]. [consulta: 12 mayo 2019]. Disponible en: <https://eebe.upc.edu/ca/estudis/treball-de-fi-destudis/documents-i-normatives>

